Cezar Marcel DOCA

Constantin PĂUNOIU

INTRODUCERE ÎN LUMEA REACTOARELOR NUCLEARE DE FISIUNE

CONTRIBUȚIE LA RO.WIKIPEDIA.ORG

Editura Universității din Pitești – 2007

ISBN: 978-973-690-684-8

CUVÂNT ÎNAINTE

Această carte nu se substituie vreunui tratat, manual sau curs de specialitate: nici de teorie fizică, nici de inginerie, nici măcar de istorie a ştiinţei şi tehnicii.

Lucrarea de față este parte a contribuției noastre la wikipedia în limba română.

Prezentul eseu foloseşte şi, la rândul său, oferă cititorului informații sub GNU Free Documentation Licence.

AUTORII
Institutul de Cercetări Nucleare Piteşti

CUPRINS

NOTIȚE
pentru cei care nu au răbdare să citească toată cartea . 7
SCURT ISTORIC 13
ATOMUL 23
NUCLEUL ATOMIC 31
FISIUNEA NUCLEARĂ 37
REACȚIA DE FISIUNE ÎN LANȚ 43
COMBUSTIBILI NUCLEARI 47
REACTORUL NUCLEAR DE FISIUNE . . . 57
STRATEGII ŞI FILIERE 71
DEŞEURI RADIOACTIVE 101
CENTRALA NUCLEARO–ELECTRICĂ . . 113
ACCIDENTE NUCLEARE 117
SECURITATE NUCLEARĂ 141
CONCLUZII
pentru cei care au avut răbdare să citească toată cartea . 151
BIBLIOGRAFIE 155
ANEXE 157

NOTIȚE
pentru cei ce nu au răbdare să citească toată cartea

- *Atomul* este format dintr-un nucleu central înconjurat de un nor de electroni.
- La rândul său, *nucleul atomic* conține protoni şi, cu excepția nuclidului ^{1}H (hidrogen), neutroni.

- Botezată *electron* de George Stoney, această particulă a fost descoperită şi prezentată în 1987 de Johann Emil Wiechert şi, independent, trei luni mai târziu, de Joseph John Thomson.
- Cu o rază mai mică de 10^{-22} m, electronul face parte din familia fermionilor, grupa leptonilor şi este caracterizat prin:
  - sarcina electrică = $-1{,}60217733 \times 10^{-19}$ C;
  - masa = $9{,}10938188(72) \times 10^{-31}$ kg;
  - momentul giromagnetic = $-1{,}0011596521883(42)\ \mu_B$;
  - momentul de dipol electric = $(-0{,}3 \pm 0{,}8) \times 10^{-29}\ e$ m;
  - spinul = ½.
- Având un timp de viață > 13×10^{30} s, electronul interacționează gravitațional, electromagnetic şi prin forță nucleară slabă, antiparticula sa numindu-se *pozitron*.

- *Protonul* a fost descoperit în 1911 de Ernest Rutherford.
- Cu o rază de $0{,}89(1) \times 10^{-15}$ m, protonul este fermion / hadron / barion / nucleon şi se compune din trei *quarci*: 1 *down* şi 2 *up*.
- Protonul are:
  - sarcina electrică = $+1{,}60217733 \times 10^{-19}$ C;
  - masa = $1{,}67262158(13) \times 10^{-27}$ kg;
  - momentul magnetic = $2{,}2792847337(29)\ \mu_N$;
  - momentul de dipol electric = $(-4 \pm 6) \times 10^{-26}\ e$ m;
  - polarizabilitatea electrică = $12{,}1(0{,}9) \times 10^{-4}$ fm^3;

- polarizabilitatea magnetică = 2,1(0,9) × 10^{-4} fm^3;
- spinul = ½.

- Timpul de viață al protonului este de 1,6×10^{25} ani, iar antiparticula sa se numeşte *antiproton*.

- *Neutronul* a fost descoperit în 1932 de James Chadwick.
- Cu o rază de ~ 1×10^{-15} m, neutronul este fermion / hadron / barion / nucleon şi se compune din trei quarci: 2 down şi 1 up.
- Este neutru din punct de vedere electric şi are:
  - masa = 1,67492716 × 10^{-27} kg;
  - momentul magnetic de dipol = –1.91304272(45) μ_N;
  - momentul de dipol electric = (– 3,3 ± 4,3) × 10^{-28} *e* m;
  - polarizabilitatea electrică = 0,98(23) × 10^{-3} fm^3;
  - spinul = ½.
- Cu un timp de viață = 887,0(2,0) s, *neutronul liber* se dezintegrează, rezultând: un proton, un electron şi un *neutrino*; *neutronul din nucleul atomic* poate avea timp de viață de cel puțin 10^{20} ani.

- Spontan sau în urma ciocnirii de către un neutron extern, un nucleu greu se poate scinda, rezultând cel puțin alte două nuclee mai uşoare, numite *produşi de fisiune*, şi un număr de *neutroni liberi*; fenomenul se numeşte *fisiune nucleară*.
- Dacă noii neutroni, liberi, contribuie, la rândul lor, la ruperea altor nuclee, atunci avem de a face cu o *reacție de fisiune în lanț*.
- În cazul în care numărul acestor scindări succesive creşte în timp, în mod necontrolat, fisiunea în lanț poate cunoaşte o evoluție *explozivă*, fenomenul prezentând importanță practică în special din punct de vedere militar.

- Într-o fisiune nucleară, neutronii liberi sunt generați cu energii cinetice mari, ei mai numindu-se şi *neutroni rapizi*.
- Neutronii rapizi pot fi încetiniți (termalizați, moderați) prin ciocniri cu alte nuclee, devenind, astfel, *neutroni lenți*.
- Materialul utilizat la încetinirea neutronilor rapizi se numeşte *moderator*, exemple în acest sens fiind grafitul şi apa grea (D_2O).
- Atomii ale căror nuclee fisionează la ciocnirea cu neutronii rapizi se numesc *fisionabili*; exemplu: ^{238}U şi ^{240}Pu.

- Atomii ale căror nuclee fisionează la ciocnirea cu neutronii termici se numesc *fisili*; exemple: ^{233}U, ^{235}U şi ^{239}Pu.

- Analog combustibilului chimic, care este ars pentru a obține energie, *combustibil nuclear* este orice material care poate fi *consumat* în reacții de fisiune în lanț pentru a obține energie electrică.
- Cel mai comun tip de combustibil nuclear este reprezentat de elementele fisile grele folosite în reactorul nuclear.
- Combustibilii nucleari pot fi utilizați sub diferite forme:
  - *oxizi* (UOX, MOX);
  - *metalici* (TRIGA, cu actinide);
  - *ceramici* (nitrură de uraniu, carbură de uraniu);
  - *lichizi* (săruri anhidre topite, soluții apoase ale sării de uranil).
- Nu toți combustibilii nucleari sunt folosiți în reacții de fisiune în lanț; de exemplu: ^{238}Pu este folosit pentru a produce energie în cantități mici prin dezintegrare radioactivă în *generatoarele radiotermale* sau *pile atomice*.

- *Reactorul nuclear de fisiune* este o instalație în care este inițiată o reacție nucleară în lanț, controlată şi menținută la o rată staționară.
- Reactorul nuclear de fisiune poate fi:
  - *reactor termic*, dacă utilizează neutroni termici şi, evident, moderator;
  - *reactor rapid*, dacă utilizează neutroni rapizi.
- Căldura degajată într-un reactor nuclear este îndepărtată (şi utilizată) cu ajutorul unui *agent de răcire* care poate fi gaz (heliu, bioxid de carbon etc.), sau lichid (apă, topituri).
- Cele mai cunoscute strategii şi filiere de reactoare[1] nucleare de fisiune sunt:
  - Magnox;
  - Gas-Cooled Reactor (GCR);
  - Advanced Gas-cooled Reactor (AGR);
  - High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR);
  - Very High Temperature Reactor (VHTR);
  - Gas-cooled Fast Reactor (GFR);

[1] Conform DEX, pluralul substantivului *reactor* este *reactoare*; în limbajul uzual al „reactoriştilor" români se foloseşte şi plurarul *reactori*, mai ales în sintagmele *reactori rapizi* şi *reactori reproducători*, în loc de *reactoare rapide*, respectiv, *reactoare reproducătoare*.

- Light Water Reactor (LWR);
- Pressurized Water Reactor (PWR);
- Boiling Water Reactor (BWR);
- Advanced Boiling Water Reactor (ABWR);
- Heavy Water Reactor (HWR);
- Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR);
- Advanced CANDU Reactor (ACR);
- Reactorul RBMK (Реактор Большой Мощности Канальный);
- Reactorul VVER (o alternativă la reactorul RBMK);
- SuperCritical Water Reactor (SCWR);
- Liquid metal cooled reactor, Fast Breeder Reactor (FBR);
- Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR);
- Sodium cooled Fast Reactor (SFR);
- Lead cooled Fast Reactor (LFR);
- Molten Salt Reactor;
- Molten Salt Breeder Reactor (MSBR);
- Advanced Liquid Metal Reactor (sau Integral Fast Reactor);
- Pebble Bed Reactor (PBR) & Pebble Bed Modular Reactor (PBMR).

- Conceptul unui *reactor nuclear natural* a fost teoretizat încă din 1956 de Paul Kurola la University of Arkansas.
- Cincisprezece reactoare de fisiune naturale se găsesc în trei depozite separate de minereu la mina Oklo din Gabon, în vestul Africii.
- Descoperite în septembrie 1972 de Francis Perrin, acestea sunt cunoscute ca *Reactoarele Fosile Oklo* şi funcționează de aproximativ 150 milioane de ani, având o putere medie de 100 kW.

- *Deşeurile radioactive* conțin elemente chimice radioactive care nu mai au utilizare practică.
- Deşeurile pot fi de *nivel radioactiv*:
  - *scăzut* (Low Level Waste – LLW)
  - *intermediar* (Intermediate Level Waste – ILW)
  - *înalt* (High Level Waste – HLW).
- În Statele Unite se mai defineşte şi *Deşeul transuranic* (Transuranic Waste – TRUW).
- Principalele probleme ale *managementului deşeurilor radioactive HLW* se referă la:
  - stocarea în bazine cu apă uşoară (bazine de calmare a combustibilului ars scos dintr-un reactor nuclear);

- vitrifierea;
- imobilizarea în rocă sintetică (Synroc);
- depozitarea în straturi geologice;
- transmutația;
- reutilizarea deşeului;
- depozitarea în spațiu extraterestru.

- În legătură cu instalațiile nucleare şi materialele (inclusiv deşeurile) radioactive, pot avea şi au avut deja loc importante evenimente civile şi militare.
- Datorită naturii lor diferite, aceste evenimente se împart în *accidente nucleare* şi *accidente cu radiație*.

- Pentru a permite comunicarea promptă şi coerentă a informației semnificative din punct de vedere al siguranței în cazul accidentelor nucleare, *IAEA Viena* a introdus *International Nuclear Event Scale* (INES).
- Scala INES cuprinde 7(8) nivele şi anume:
  - Nivelul 7 – *accident major* (accident maxim credibil);
  - Nivelul 6 – *accident serios*;
  - Nivelul 5 – *accident cu risc în afara locației*[2];
  - Nivelul 4 – *accident fără risc în afara locației*;
  - Nivelul 3 – *incident serios*;
  - Nivelul 2 – *incident*;
  - Nivelul 1 – *anomalie*;
  - Nivelul 0 – *deviație*.

- Mai există, de asemenea, şi evenimente fără relevanță în siguranță, caracterizate ca fiind *în afara scalei*.
- În carte sunt descrise, pe scurt, cele mai documentate: 26 accidente nucleare din domeniul civil, 36 accidente cu radiații din domeniul civil şi 49 accidente nucleare şi cu radiații dn domeniul militar.

[2] În această lucrare, substantivul *locație* este folosit exclusiv cu semnificațiile: *loc, localizare, amplasament*, ca rezultat al traducerii în limba română a englezescului *location*

SCURT ISTORIC

Atomul

Prima formulare filozofică a unei idei similare celei de atom a fost dezvoltată de Democrit în Grecia secolului al VI-lea î.d.Ch. Ideea s-a pierdut timp de secole, până la reaprinderea interesului ştiinţific din epoca Renaşterii.

În secolul al XIX-lea, John Dalton a vrut să cunoască de ce se sparg substanţele în constituenţi proporţionali. Pentru Dalton, fiecare element chimic a fost reprezentat printr-un tip de atom, şi vice-versa.

În ultima parte a secolului al XIX-lea, William Crookes a inventat tubul cu raze catodice, realizare ce i-a permis să observe, primul, particule încărcate negativ.

Aproape de trecerea către secolul al XX-lea, J.J. Thomson, în urma cercetărilor sale privind razele catodice, a descoperit că atomii sunt, de fapt, divizibili, fiind parţial compuşi din particule foarte uşoare încărcate negativ (dovedite a avea proprietăţi identice indiferent de elementul chimic de la care proveneau), ce au fost numite mai târziu electroni. De altfel J.J. Thomson propune primul model de atom, în care electronii sunt distribuiţi într-o structură sferică cu sarcină pozitivă, precum „stafidele într-un cozonac”.

În 1911, Ernest Rutherford a descoperit că electronii orbitează un nucleu compact, iar hidrogenul posedă cel mai uşor nucleu, pe care l-a numit proton (în limba greacă, προτου înseamnă *primul*).

Pentru a explica de ce electronii „nu cad, în spirală, pe nucleu”, Niels Bohr a dezvoltat un model al atomului în care, folosind rezultatele mecanicii cuantice, electronii nu pot să parcurgă decât orbite circulare fixate.

După descoperirea principiului de incertitudine / imprecizie al lui Werner Heisenberg, conceptul de *orbită circulară* a fost înlocuit cu cel de *nor*, în interiorul căruia distribuţia electronilor a fost descrisă prin ecuaţii probabilistice.

În sfârşit, după descoperirea, în anul 1932, a neutronului, particulă neutră din punct de vedere electric, nucleele atomice ale elementelor mai grele decât hidrogenul s-au găsit a fi formate din protoni şi neutroni, aceste ultime rezultate completând concepţia modernă despre structura atomică.

Nucleul atomic

La începutul secolului al XX-lea fizicienii au descoperit trei tipuri de radiaţii provenind din atomi, pe care ei le-au numit radiaţii *alfa*, *beta* şi *gamma*.

Experimentele din 1911 ale lui Lise Meitner şi Otto Hahn, precum şi cele ale lui James Chadwick din 1914, concluzionau că interpretarea caracteristicilor spectrale ale dezintegrării beta ar presupune admiterea neconservării energiei. Această problemă a condus la descoperirea, mai târziu, a neutrinului.

În aceeaşi perioadă, Ernest Rutherford a realizat un experiment remarcabil în care Hans Geiger şi Ernest Marsden, sub supravegherea lui Rutherford, au bombardat cu particule alfa (nuclee de heliu) o foiţă subţire din aur. Modelul „cozonacului cu stafide" al lui J.J. Thomson prezicea că particulele alfa ar fi trebuit să iasă din foiţa de aur pe o traiectorie, eventual, puţin curbată. Ei au fost surprinşi să descopere că unele particule au fost împrăştiate sub unghiuri mari, în câteva cazuri fiind chiar întoarse înapoi.

Descoperirea a condus la modelul Rutherford, în care atomul are un nucleu foarte mic şi foarte dens, constituit din particule grele cu sarcină pozitivă şi electroni, nucleul fiind înconjurat de alte sarcini negative. De exemplu, în acest model, azotul (^{14}N) consta dintr-un nucleu cu 14 protoni şi 7 electroni, iar nucleul era orbitat de alţi 7 electroni.

Modelul lui Rutherford a „mers" destul de bine până la studiile privind spinul nuclear, efectuate în 1929 de Franco Rasetti la California Institute of Technology.

Încă din 1925 se ştia că protonul şi electronul au spini ½. În modelul Rutherford al atomului de ^{14}N, cei 14 protoni şi 6 electroni trebuiau să formeze perechi unii cu alţii, pentru a-şi anula reciproc spinul, astfel încât ultimul electron să confere nucleului un spin ½.

Rasetti a descoperit că ^{14}N are spin 1.

În 1930, neputând să ajungă în oraşul german Tübingen, la o întâlnire pe probleme de radioactivitate, Wolfgang Pauli le trimite participanţilor o scrisoare prin care sugera posibilitatea ca în nucleu să existe o a treia particulă, pe care el o denumea „neutron", mai uşoară decât

un electron, fără sarcină electrică şi care nu interacţionează cu substanţa (fapt pentru care nici nu fusese încă detectată).

Această soluţie disperată a rezolvat ambele probleme: cea a conservării energiei şi aceea a spinului nucleului de ^{14}N; mai întâi deoarece „neutronul" lui Pauli transporta cu el extra-energia dezintegrării beta şi apoi pentru că prezenţa unui „extra-neutron" în nucleul ^{14}N îi conferea acestuia spinul 1.

„Neutronul" lui Pauli a fost redenumit *neutrino*, de Enrico Fermi, în 1931, dar abia după 30 de ani s-a demonstrat, definitiv, că, într-adevăr, neutrino este emis în dezintegrarea beta.

În 1932 Chadwick a realizat că radiaţia pe care o observaseră Walther Bothe, Herbert Becker, Irène şi Frédéric Joliot-Curie se datora unei particule masive pe care el a numit-o neutron.

În acelaşi an Dmitrij Iwanenko a sugerat că neutronii sunt particule cu spin ½, că nucleul conţine neutroni şi că *în nucleu nu există electroni*.

La rândul său Francis Perrin a sugerat că neutrino nu sunt particule nucleare, dar erau create în timpul dezintegrării beta.

La sfârşitul anului 1932 Fermi a trimis o teorie a neutrinului revistei Nature, al cărui editor a respins-o deoarece era „prea departe de realitate". Fermi a continuat să lucreze la teoria sa şi în 1934 a publicat o lucrare care plasa neutrino pe solide fundamente teoretice.

În acelaşi an, Hideki Yukawa a propus prima teorie semnificativă a forţelor nucleare tari pentru a explica menţinerea împreună a nucleonilor.

Cu lucrările lui Fermi şi Yukawa s-a completat modelul modern al atomului.

Centrul atomului constă dintr-o regiune (sferică) compactă de neutroni şi protoni care sunt menţinuţi împreună de către forţele nucleare tari. Nucleele instabile pot suferi dezintegrări alfa, în care ele emit nuclee energetice de heliu, sau dezintegrări beta, în care ele emit electroni sau pozitroni.

După una dintre aceste dezintegrări, nucleul rezultat poate să se găsească, la rândul său, într-o stare excitată şi, în acest caz, se dezintegrează şi el, către o stare de bază, emiţând fotoni de înaltă energie (dezintegrare gamma).

Fisiunea nucleară

Rezultatele bombardării uraniului cu neutroni s-au dovedit a fi interesante şi enigmatice; studiate prima dată de Enrico Fermi şi colegii lui în 1934, nu au fost interpretate corect decât mult mai târziu.

Pe 16 ianuarie 1939, danezul Niels Bohr ajungea în Statele Unite pentru a locui câteva luni în Princeton, statul New Jersey. Patru ani mai târziu Bohr a fugit din Danemarca ocupată de nazişti. Chiar înainte ca Bohr să părăsească Danemarca, la bordul unui vapor, doi dintre colegii săi, Otto Robert Frisch şi Lise Meitner, amândoi refugiaţi din Germania, i-au comunicat bănuiala că absorbția neutronului de către nucleul de uraniu conduce uneori la scindarea nucleului în părți aproximativ egale şi eliberarea unei enorme cantități de energie, proces pe care ei l-au botezat *fisiune nucleară*, asemănător fisiunii / divizării celulelor vii din biologie.

Această ipoteză a fost precedată de descoperirea importantă a lui Otto Hahn şi Fritz Strassmann din Germania, publicată în *Naturwissenschaften* la începutul lunii Ianuarie 1939, care a demonstrat că un izotop de bariu a fost produs prin bombardarea uraniului. Bohr a promis să țină secretă interpretarea Meitner / Frisch până la publicarea lucrării lor, pentru păstrarea priorității, dar la bordul vaporului a discutat această problemă cu Léon Rosenfeld, uitând să-l roage s-o mențină, la rândul său, secretă.

Rosenfeld, imediat după părăsirea vaporului, a vorbit despre această descoperire tuturor celor de la Princeton University, şi de la aceştia ştirea s-a răspândit în lumea fizicienilor, ajungând inclusiv la Enrico Fermi, la Columbia University. După unele discuții între Fermi, John R. Dunning şi G.B. Pegram, la Columbia University s-a realizat un experiment de ionizare cu puls de putere de la care se aştepta obținerea unor fragmente de nuclee de uraniu.

Pe 29 Ianuarie 1939 a avut loc o conferință de fizică teoretică în Washington D.C., sponsorizată de George Washington University şi Carnegie Institution of Washington. Fermi a părăsit New York-ul pentru a participa la această conferință înainte ca experimentul de fisiune de la Columbia University să fi fost realizat. La conferință, Bohr şi Fermi au discutat problema fisiunii şi, în particular, Fermi a menționat posibilitatea ca pe durata procesului să fie emişi neutroni. Deşi acest lucru era doar o presupunere, erau evidente implicațiile sale privind posibilitatea unei reacții nucleare în lanț.

„Reacția în lanț” era cunoscută la aceea vreme ca un fenomen chimic, dar procese analoge în fizica nucleară, folosind neutroni, au fost anticipate încă dinainte de 1933 de Leo Szilárd, cu toate că Szilárd nu avea

nici o idee cu ce materiale s-ar fi putut iniția un astfel de proces. Acum, după descoperirea fisiunii elementelor grele, indusă de neutroni, s-au publicat numeroase articole senzaționale pe subiectul reacțiilor nucleare în lanț.

Înaintea terminării conferinței din Washington, au fost inițiate mai multe experimente de confirmare a fisiunii, rezultate pozitive fiind raportate pe 15 Februarie 1939 în Physical Review, de patru laboratoare: Columbia University, Carnegie Institution of Washington, Johns Hopkins University, University of California. În acelaşi timp Bohr a auzit că experimente similare au fost făcute în Copenhaga în jurul datei de 15 Ianuarie; lucrarea lui Frisch trimisă revistei Nature este datată 16 Ianuarie 1939 şi a apărut în numărul din 18 Februarie.

La Paris, Frédéric Joliot a publicat de asemenea primele sale rezultate în Comptes Rendus din 30 Ianuarie 1939. Din acest moment lucrările pe subiectul fisiunii s-au înmulțit astfel încât în Decembrie 1939 numărul acestora ajunsese deja la o sută.

Ținta majoră a primelor cercetări de fisiune a fost *producerea unei reacții nucleare în lanț controlată*, care ar fi condus la realizarea unei prime Centrale Nuclearo-Electrice. În vederea atingerii acestui obiectiv s-a procedat la construirea lui *Chicago Pile-1*, primul reactor nuclear cu fisiune critică din lume realizat de om, care a folosit uraniu, singurul combustibil nuclear disponibil în cantități utile. În acelaşi timp a fost demarat şi *Proiectul Manhattan*, destinat fabricării armelor nucleare.

Reacția de fisiune nucleară în lanț

Conceptul de reacție de fisiune nucleară în lanț a fost dezvoltat de Leo Szilárd în 1933, pentru care a solicitat, în anul următor, un patent de invenție. În 1936 Leo Szilárd a încercat să obțină o reacție în lanț folosind beriliu şi indiu, dar a eşuat.

Prima reacție nucleară în lanț artificială, autoîntreținută, a fost inițiată de Metallurgical Laboratory, condus de Enrico Fermi şi Leo Szilárd, sub peluza stadionului Universității din Chicago, pe 2 Decembrie 1942, în cadrul Proiectului Manhattan.

Producerea în lanț a reacției de fisiune folosind uraniu drept combustibil nuclear este departe de a fi un lucru uşor. Vechile reactoare nucleare nu au folosit uraniu îmbogățit şi, prin urmare, a fost necesară utilizarea unei cantități mari de grafit purificat pe post de material moderator de neutroni. Folosirea apei uşoare (în opoziție cu apa grea) într-un reactor

nuclear presupune utilizarea de combustibil îmbogăţit, obţinut prin creşterea concentraţiei de mai rar răspânditul izotop ^{235}U din minereul natural, acesta din urmă conţinând cu precădere izotopul ^{238}U.

În mod normal, reactoarele nucleare presupun includerea, pe post de moderator de neutroni, a unor materiale extrem de pure chimic, cum ar fi: deuteriu (în apa grea), heliu, beriliu sau carbon sub formă de grafit. Înalta puritate este cerută deoarece multe impurităţi chimice, cum ar fi borul, sunt absorbanţi puternici de neutroni şi, astfel, o adevărată *otravă* pentru reacţia în lanţ.

Mai urma să fie rezolvată problema producerii unor astfel de materiale la scară industrială. Până în 1940, cantitatea de uraniu metalic produsă în SUA a fost de câteva grame şi acestea de o puritate nesigură; la fel: câteva kilograme de beriliu metalic, câteva kilograme de apă grea şi nici o cantitate de carbon cu puritatea cerută de un moderator.

Problema producerii în cantităţi mari a uraniului de puritate înaltă a fost rezolvată de Frank Spedding folosind procese *thermit* (oxidarea aluminiului metalic). În 1942 Ames Laboratory a reuşit să producă o cantitate mare de uraniu natural (neîmbogăţit) ce ar fi urmat să fie folosit în cercetările următoare. Succesul cu Chicago Pile-1, care folosea uraniu natural, la fel ca toate „pilele" atomice care produceau plutoniu pentru bomba atomică, se datora, de asemenea, rezultatelor lui Szilárd conform cărora numai *grafitul foarte pur* putea fi folosit ca moderator în reactoarele cu uraniu natural.

În timpul celui de al doilea război mondial, în Germania, neîncrederea în calităţile grafitului foarte pur a condus la proiectarea unui reactor depinzând de apa grea, produsă în Norvegia, dar „interzisă" germanilor în urma atacurilor distrugătoare ale aliaţilor. Aceste dificultăţi i-au împiedicat pe nazişti să construiască un reactor în timpul războiului.

Fapt necunoscut până în anul 1972, când fizicianul francez Francis Perrin a descoperit *Reactoarele Fosile de la Oklo*, natura a luat-o înaintea omului în ceea ce priveşte reacţia de fisiune în lanţ a uraniului încă de acum 2 miliarde de ani. Acest proces a putut folosi ca moderator apa uşoară deoarece acum 2 miliarde de ani uraniul natural a fost mult mai bogat în izotopi de ^{235}U decât în zilele noastre.

Reactorul nuclear

Deşi omenirea a îmblânzit recent puterea nucleară, primele reactoare nucleare au apărut în mod natural.

Cincisprezece reactoare de fisiune naturale au fost găsite în trei depozite separate de minereu la mina Oklo din Gabon, în vestul Africii. Descoperite pentru prima dată de Francis Perrin, acestea sunt numite ca *Reactoarele Fosile Oklo*, funcționează de aproximativ 150 milioane de ani, având o putere medie de 100 kW.

De asemenea, emisia de căldură, lumină şi radiații de la stele se bazează pe fuziunea nucleară.

Conceptul unui reactor nuclear natural a fost teoretizat încă din 1956 de Paul Kurola la University of Arkansas.

Enrico Fermi şi Leo Szilárd, ambii de la University of Chicago, au fost primii care au construit o pilă nucleară şi au prezentat o reacție în lanț controlată, pe 2 Decembrie 1942. În 1955 ei şi-au împărțit patentul de invenție pentru reactorul nuclear U.S. Patent 2.708.656.

Primul reactor nuclear a fost utilizat pentru a genera plutoniu pentru *bomba atomică* (cunoscută şi sub numele de *bomba nucleară*). Alte reactoare au fost folosite în navigație pentru propulsarea submarinelor şi chiar a avioanelor. La mijlocul anilor '50, Uniunea Sovietică şi țările vestice şi-au extins cercetările pentru a include şi utilizarea nemilitară a atomului. Totuşi, ca şi programul militar, multe din lucrările nemilitare au fost făcute în secret.

Pe 20 Decembrie 1951, în SUA, a fost generat pentru prima dată curent electric folosind energie nucleară la Experimental Breeder Reactor-I (EBR-1), localizat lângă Arco, statul Idaho. Pe 26 Iunie 1954, la ora 5:30 a început să genereze curent electric prima centrală nucleară sovietică, la Obninsk, Kaluga Oblast. Ea a produs 5 MW, asigurând electricitate pentru 2.000 de case.

Prima centrală nucleară de tip comercial din lume a început să funcționeze pe 17 Octombrie 1956, la Calder Hall. Un alt reactor de putere timpuriu a fost Shippingport Reactor, în Pennsylvania (1957).

Chiar înainte de accidentul din 1979 de la Three Mile Island, au fost oprite unele comenzi pentru centrale nucleare în USA din rațiuni economice legate în primul rând de durata lungă de construcție. De altfel din 1978 nu s-au mai construit centrale în SUA; situația s-ar putea schimba după 2010.

Spre deosebire de accidentul de la Three Mile Island, accidentul din 1986 de la Cernobîl nu a înăsprit reglementările cu privire la reactoarele din Vest. Aceasta deoarece reactoarele de la Cernobîl, de tip RBMK, erau cunoscute ca având un proiect fără structuri suplimentare de siguranță şi operate nesigur, iar Vestul auzise prea puține despre ele. Au fost totuşi şi

unele precipitări politice: Italia a ținut un referendum în anul următor, 1987, ale cărui rezultate au condus la oprirea a patru centrale nucleare.

În 1992 centrala turcească Turkey Point Nuclear Generation Station a fost lovită direct de uraganul Andrew. Au fost pagube de peste 90 milioane de dolari, cele mai mari la un rezervor de apă şi un coş de fum al unei unități funcționând cu combustibili fosili, dar clădirile de protecție nu au avut de suferit.

Prima structură de dezvoltare a sistemelor nucleare de putere utilitare, şi anume US Navy, este singura din lume cunoscută ca având o activitate total curată. US Navy a operat mai multe reactoare decât orice altă entitate, chiar şi decât Forțele Navale sovietice (actualmente ruseşti), fără incidente majore făcute publice. Totuşi două submarine americane, USS Scorpion şi Thresher, au fost pierdute în ocean, din motive ce nu au avut legătură cu reactoarele din dotare, epavele lor fiind astfel situate încât riscul de poluare nucleară este considerat scăzut.

Perspective de viitor

În 2006, centrala *Watts Bar 1* era ultimul reactor nuclear comercial operațional pus în funcțiune, în 1997. Acest fapt este adesea citat ca o dovadă a succesului campaniei mondiale pentru închiderea treptată a centralelor nucleare.

Oricum, rezistența politică față de centralele nucleare a avut din când în când succes în diferite părți ale Europei, în Noua Zeelandă, în Filipine şi în Statele Unite. Cu toate acestea, în SUA şi Europa au continuat investițiile în cercetări privind ciclul combustibilului nuclear şi, deşi unii experți prezic viață scurtă electricității, creşterea prețului combustibilului fosil, precum şi preocupările legate de actualele emisii de gaze şi efectul de seră vor înnoi cererea de centrale nucleare.

Folosirea energiei nucleare este controversată din cauza problemei stocării deşeurilor radioactive pe durate de timp nedefinite, a posibilității de contaminare radioactivă severe ca urmare a unui accident sau a unor acțiuni de sabotaj şi, nu în ultimul rând, din cauza posibilității utilizării acestor deşeuri de către unele țări în vederea proliferării armelor nucleare.

Susținătorii energeticii nucleare cred că aceste riscuri sunt mici şi pot fi reduse în continuare prin tehnologia noilor reactoare. Mai mult, ei susțin că siguranța în domeniul energeticii nucleare este chiar mai bună decât cea din centralele cu combustibili fosili, inclusiv în ceea ce priveşte eliberarea

de deşeuri radioactive, acestea fiind cantitativ mai puține decât într-o centrală pe cărbune.

Criticii energeticii nucleare, incluzând şi cea mai mare parte a grupărilor ecologiste, cred că aceasta este neeconomică, nesănătoasă şi potențial periculoasă, mai ales prin comparație cu sursele regenerabile, şi nu sunt convinşi că noile tehnologii ar putea reduce riscurile şi costurile implicate.

O opțiune energetică de viitor (şi subiect ce va fi abordat, cu siguranță, în cadrul aceluiaşi tip de discuții „pro" şi „contra") vor fi centralele electrice bazate pe fuziunea nucleară controlată.

Multe țări rămân active în dezvoltarea centralelor nucleare, incluzând aici: Japonia, China şi India, toate trei dezvoltând atât tehnologii termice cât şi reproducătoare, Coreea de Sud şi Statele Unite, ambele dezvoltând numai tehnologii termice, şi Africa de Sud şi, din nou, China, dezvoltând versiuni ale reactorului de tip PBMR (Pebble Bed Modular Reactor = Reactor modular cu strat granular).

Finlanda şi Franța îşi continuă în mod activ programele nucleare; Finlanda are în construcție un nou European Pressurized Reactor.
Din 2005 şi Japonia a demarat un program activ de construcții pentru noi unități.

În Statele Unite, trei consorții au răspuns încă din 2004 solicitării făcute de Department of Energy privind Programul Energetic Nuclear 2010, în vederea construirii inclusiv a unui reactor de generația a IV-a, tip VHTR, destinat producerii de electricitate şi hidrogen. Pe 22 Septembrie 2005, s-a anunțat deja selectarea a două locații din SUA destinate construirii de noi reactoare.

Centralele nucleare reprezintă un interes particular pentru China şi India, ambele construind reactoare de tip FBR.

În politica energetică a Marii Britanii se prevede construirea, în viitor, cel puțin a unei noi centrale nucleare şi menținerea şi prelungirea duratei de viață a celor existente deja.

ATOMUL

Atomul este ultima diviziune ce mai poartă încă proprietățile chimice ale unei substanțe oarecare (ale unui element chimic).

Dacă, inițial, cuvântul *atom* însemna cea mai mică particulă, indivizibilă (în limba greacă ατομος înseamnă *indivizibil*), mai târziu, după ce termenul a căpătat o semnificație precisă în știință, atomii au fost găsiți a fi divizibili şi compuşi din particule şi mai mici, subatomice.

Cu excepția protiumiului, izotop al hidrogenului, atomii sunt compuşi din trei tipuri de particule:

Electronul

Purtând numele dat de George Stoney, această particulă a fost descoperită şi prezentată în 1987 de Johann Emil Wiechert şi, independent, trei luni mai târziu, de Joseph John Thomson.

Cu o rază mai mică de 10^{-22} m, electronul face parte din familia fermionilor, grupa leptonilor şi are:

- sarcina electrică = $-1{,}60217733\times10^{-19}$ C;
- masa = $9{,}10938188(72)\times10^{-31}$ kg;
- momentul giromagnetic = $-1{,}0011596521883(42)\ \mu_B$;
- momentul de dipol electric = $(-0{,}3 \pm 0{,}8)\times10^{-29}\ e$ m;
- spinul = ½.

Electronul interacționează gravitațional, electromagnetic şi prin forță nucleară slabă, antiparticula sa numindu-se *pozitron*.

Protonul

A fost descoperit în 1911 de Ernest Rutherford. Cu o rază de numai $0,8\times10^{-15}$ m, protonul este fermion → hadron → barion → nucleon şi se compune din trei *quarci*: 1 *down* şi 2 *up*.

Protonul are:

- sarcina electrică = $+1,60217733\times10^{-19}$ C;
- masa = $1,67262158(13)\times10^{-27}$ kg;
- momentul magnetic = 2,2792847337(29) μ_N;
- momentul de dipol electric = $(-4 \pm 6)\times10^{-26}$ *e* m;
- polarizabilitatea electrică = $12,1(0,9)\times10^{-4}$ fm^3;
- polarizabilitate magnetică = $2,1(0,9)\times10^{-4}$ fm^3;
- spinul = ½.

Timpul de viaţă al protonului este de $1,6\times10^{25}$ ani, iar antiparticula sa se numeşte *antiproton*.

Neutronul

A fost descoperit în 1932 de James Chadwick. Cu o rază de aproximativ 10^{-15} m, neutronul este fermion → hadron → barion → nucleon şi se compune din trei quarci: 2 down şi 1 up.

Neutronul este, după cum îi spune şi numele, neutru din punct de vedere electric şi are:

- masa = $1,67492716\times10^{-27}$ kg;
- momentul magnetic de dipol = –1.91304272(45) μ_N;
- momentul de dipol electric = $(-3,3 \pm 4,3)\times10^{-28}$ *e* m;
- polarizabilitatea electrică = $0,98(23)\times10^{-3}$ fm^3;
- spinul = ½.

Cu un timp de viaţă de 887,0 s, *neutronul liber* se dezintegrează, rezultând: un proton, un electron şi un neutrino.

Timpul de viaţă al unui *neutron din nucleul atomic* este de cel puţin 10^{20} ani.

Protonii şi neutronii creează un *nucleu atomic* dens şi masiv, ei fiind numiţi şi *nucleoni*. Electronii formează un larg nor electronic ce înconjoară nucleul.

Atomii diferă prin numărul şi tipul de particule subatomice constituente. Atomii care au acelaşi număr de protoni desemnează acelaşi

element chimic. Variația numărului de neutroni din atomii unui element determină *izotopii* acestuia.

Numărul de protoni şi neutroni din nucleul atomic poate fi modificat prin intermediul *fuziunii nucleare*, a *fisiunii nucleare* sau a *dezintegrării radioactive*, cazuri în care atomul nu mai rămâne elementul care era la început.

Atomii sunt electric neutri dacă au acelaşi număr de protoni şi electroni. Numărul de electroni este foarte uşor de modificat, din cauza valorii scăzute a energiei lor de legătură. Atomii care au un deficit sau un surplus de electroni se numesc *ioni*.

Electronii care sunt departe de nucleu pot fi transferați unui atom din apropiere sau pot fi folosiți în comun de doi sau mai mulți atomi. Prin intermediul acestui ultim mecanism atomii sunt legați în molecule şi alte tipuri de compuşi chimici cum ar fi rețelele cristaline ionice şi covalente.

Atomii sunt „cărămizile" fundamentale ale chimiei şi ei se conservă în reacțiile chimice.

Configurația electronică

Comportarea chimică a atomilor este determinată de interacțiunile dintre electroni. Electronii unui atom rămân în interiorul unor configurații fixate, predictibile. Aceste configurații electronice sunt descrise de mecanica cuantică şi anume de cinematica electronilor în potențialul electric al nucleului.

Un nivel electronic poate avea până la $2n^2$ electroni, unde n este *numărul cuantic principal* al acestuia. Nivelul ocupat cu cel mai mare n este *nivelul de valență*, chiar dacă acesta ar avea un singur electron. În cea mai stabilă stare, de bază, electronii unui atom vor umple nivelele acestuia în ordinea crescătoare a energiei.

În unele circumstanțe, un electron poate fi excitat pe un nivel de energie mai mare (electronul absoarbe energie de la o sursă externă şi sare pe un nivel mai înalt) lăsând un loc *gol* în nivelul energetic inferior. Electronii unui atom excitat vor „cădea" în mod spontan pe nivelul inferior, emițând energia excedentă sub formă de fotoni, până la revenirea la starea de bază.

Electronii de pe cel mai exterior nivel, numiți şi *electroni de valență*, au cea mai puternică influență în comportarea chimică a atomului. Electronii de pe nivelele interioare, deci nu cei de valență, joacă şi ei un rol, cu efecte secundare datorate ecranării sarcinii pozitive din nucleul atomic.

Pe lângă numărul cuantic principal *n*, unui electron i se mai asociază: *numărul cuantic secundar l* (numit şi număr cuantic azimutal; descrie momentul unghiular orbital), *numărul cuantic magnetic m* (descrie direcţia vectorului moment unghiular) şi *numărul cuantic de spin s* (descrie direcţia momentului unghiular intrinsec al electronului).

Electronii cu valori diferite pentru numerele cuantice *l* şi *m* aparţin la nivele distincte, evidenţiate prin notaţia spectroscopică (configuraţii **s, p, d** şi **f**). În cei mai mulţi atomi, orbitalii cu numere *l* diferite nu sunt degenerate exact ci separate printr-o structură fină. Orbitalii cu numere *m* diferite sunt degenerate dar pot fi separate doar aplicând un câmp magnetic, ceea ce se numeşte *efect Zeeman*. Electronii cu numere *s* diferite prezintă diferenţe energetice foarte slabe, caracterizând aşa-numita structură (despicare) hiperfină.

Dimensiunea atomului, viteze

Atomii sunt mult mai mici decât lungimea de undă a luminii pe care ochiul umenesc o poate detecta, fapt pentru care atomii nu pot fi văzuţi cu nici un fel de microscop optic.

Cu toate acestea, există alte căi de detectare a poziţiilor atomilor pe suprafaţa unui solid sau a unui film subţire şi chiar pentru a obţine imagini ale acestora. Este vorba despre: microscoapele electronice (microscopia cu efect de tunel), microscopia atomică (atomic force microscopy), rezonanţa magnetică nucleară şi microscopia cu raze X.

Deoarece norul de electroni nu are o formă precisă, dimensiunea unui atom nu este uşor de definit. Pentru atomii care formează reţele cristaline solide, distanţa dintre centrele a doi atomi adiacenţi poate fi determinată uşor, prin difracţie cu raze X, găsindu-se o estimare a dimensiunii atomului.

Pentru orice atom, se poate folosi raza la care se pot găsi cel mai des electronii de pe stratul de valenţă. De exemplu, dimensiunea atomului de hidrogen este estimată ca fiind de aproximativ $1{,}06\times10^{-10}$ m (de două ori raza Bohr). A se compara această valoare cu dimensiunea protonului (unica particulă din nucleul atomului ^{1}H), care este aproximativ 10^{-15} m. Cu alte cuvinte, raportul dintre dimensiunea atomului de hidrogen şi cea a nucleului său este de 100.000:1. Dacă un atom ar avea dimensiunea unui stadion de fotbal, atunci nucleul său ar trebui să fie de dimensiunea unei mărgele de sticlă.

Aproape toată masa unui atom se găseşte în nucleu şi aproape tot spaţiul din atom este ocupat de electronii săi.

Atomii diferitelor elemente variază în dimensiune, dar dimensiunea (volumul) **nu este** proporţională cu masa atomului.

Atomii grei au tendinţa generală de a fi mai denşi. Diametrele atomilor sunt aproximativ aceleaşi până la un factor mai mic de trei în cazul atomilor grei, dar cel mai notabil efect al masei asupra dimensiunii este următorul: dimensiunea atomică descreşte cu creşterea masei pentru fiecare linie din tabelul periodic.

Raţiunea acestor efecte este aceea că elementele grele au sarcină pozitivă mare în nucleu, care atrage puternic electronii către centrul atomului. Această forţă de atracţie contractează dimensiunea învelişului electronic, astfel încât un număr mai mare de electroni se pot afla într-un volum mai mic.

Efectul poate fi remarcabil: de exemplu, atomii elementului mai dens iridium (masă atomică 192) are aproximativ aceeaşi dimensiune ca atomii de aluminiu (masă atomică 27), fapt ce contribuie la stabilirea raportului densităţilor (mai mare de 8) dintre aceste metale.

Temperatura unei colecţii de atomi este o măsură a energiei medii de mişcare a acestor atomi, energie cinetică aflată deasupra energiei minime a punctului de zero cerută de mecanica cuantică; la 0 K (= –273,15 ºC, zero absolut) atomii ar trebui să nu aibă extra-energie peste acest minim. Dacă temperatura sistemului creşte, energia cinetică a particulelor din sistem creşte, deci şi viteza de mişcare creşte.

La temperatura camerei, atomii / moleculele ce formează gazele din aer se mişcă cu o viteză medie de 500 m/s (aproximativ 1.800 km/h).

Elemente, izotopi şi ioni

Atomii sunt clasificaţi în elemente chimice prin *numărul atomic Z*, care corespunde numărului de protoni din nucleul atomic. De exemplu, toţi atomii ce conţin şase protoni ($Z = 6$) sunt clasificaţi drept carbon. Elementele pot fi sortate, conform tabelului periodic, în ordinea crescătoare a numărului atomic. Această metodă pune în evidenţă cicluri repetitive regulate în proprietăţile chimice şi fizice ale respectivelor elemente.

Numărul de masă A, sau numărul nucleonic al unui element, este numărul total de protoni şi neutroni din atomul acelui element, denumit aşa deoarece fiecare proton şi neutron au masa de aproximativ 1 uam (uam =

unitate atomică de masă). O colecție particulară de Z protoni şi $A - Z$ neutroni se numeşte *nuclid*.

Fiecare element poate să aibă numeroşi nuclizi diferiți, cu acelaşi Z, dar cu un număr variabil de neutroni. Membrii unei astfel de familii de nuclizi se numesc izotopii elementului (izotop = acelaşi loc, deoarece nuclizii au acelaşi simbol chimic şi ocupă acelaşi loc în tabelul periodic).

Când se scrie numele unui nuclid particular, numele elementului (care specifică Z) este precedat de numărul de masă dacă este scris ca indice superior, sau este urmat de numărul de masă dacă nu este indiciat superior. De exemplu, nuclidul carbon-14, care poate să fi scris şi ^{14}C, este unul dintre izotopii carbonului şi conține 6 protoni şi 8 neutroni în fiecare atom (număr de masă: 14 = 6 + 8).

Cel mai simplu atom, protium, izotop al hidrogenului, are numărul atomic 1 şi numărul de masă 1; el constă dintr-un proton şi un electron.

Izotopul hidrogenului care conține şi un neutron se numeşte deuteriu sau ^{2}H; izotopul hidrogenului cu doi neutroni se numeşte tritiu sau ^{3}H.

Tritiul este un izotop instabil care se dezintegrează prin procesul numit radioactivitate.

Mulți izotopi ai fiecărui element sunt radioactivi; numărul izotopilor stabili variază puternic de la un element la altul (de exemplu, staniul are 10 izotopi stabili). Plumbul (Z = 82) este ultimul element care are izotopi stabili. Elementele cu număr atomic 83 (bismut) şi mai mare nu au izotopi stabili şi sunt toți radioactivi.

Virtual, toate elementele mai grele decât hidrogen şi heliu au fost create prin fenomenul de *nucleosinteză* din stele şi supernove. Sistemul nostru solar s-a format din nori de elemente provenite de la multe astfel de supernove, acum 4,6 miliarde de ani.

Cele mai multe elemente mai uşoare decât uraniu (Z = 92) au, fiecare, izotopi stabili sau cel puțin radioizotopi cu viață suficient de lungă ca să poată fi întâlniți în mod natural pe Pământ.

Două excepții notabile de elemente uşoare dar radioactive cu viață scurtă sunt technețiu (Z = 43) şi prometiu (Z = 61) care se găsesc în mod natural numai în stele. Alte câteva elemente grele cu viață scurtă, care nu apar pe Pământ, au fost de asemenea găsite în stele.

Elemente care nu se găsesc în mod natural pe Pământ au fost create artificial prin bombardament nuclear; până în anul 2006 s-a ajuns la elementul cu număr atomic 116 numit, temporar, „ununhexium”. Aceste elemente ultragrele sunt foarte instabile şi se dezintegrează rapid.

Atomii care au pierdut sau câştigat electroni se numesc ioni. Ionii se împart în cationi cu sarcină electrică pozitivă (+), şi anioni cu sarcină electrică negativă (–).

Atomii şi moleculele

Pentru gaze şi unele lichide şi solide moleculare (cum ar fi apa şi zahărul), moleculele sunt cele mai mici diviziuni de substanţă întâlnite în mod natural.

Există însă multe solide şi lichide care, deşi sunt compuse din atomi, ele nu conţin molecule discrete: amintim aici sărurile, rocile, metalele solide şi lichide.

Astfel, deşi moleculele sunt comune pe Pământ, intrând în formarea atmosferei şi a oceanelor, cea mai mare parte a Pământului, mai exact cea mai mare parte a crustei, întreaga manta şi tot miezul, nu sunt formate din molecule identificabile, ci, mai degrabă, reprezintă substanţă atomică dispusă în alte tipuri de aranjamente particulare de ordin microscopic.

Cele mai multe molecule sunt pluri-atomice; de exemplu, molecula de apă este formată din doi atomi de hidrogen şi un atom de oxigen.

Termenul *moleculă* a fost utilizat iniţial ca un sinonim pentru „molecula fundamentală" de gaz, indiferent de structura acestuia. Această definiţie corespunde doar pentru câteva tipuri de gaze având „molecule" formate dintr-un singur atom; de exemplu: elementele chimice inerte care nu formează compuşi, cum ar fi heliu.

Particule subatomice

Înainte de 1961 se acceptau ca particule subatomice doar electronii, protonii şi neutronii.

Azi se cunoaşte că protonii şi neutronii înşişi sunt constituiţi din două tipuri de particule şi mai mici numite *quarci: up* şi *down*. Protonul este format din doi quarci up şi un quarc down, iar neutronul este format din doi quarci down şi un quarc up.

Electronul are un partener neutru din punct de vedere electric, aproape fără masă, numit *neutrino*. Electronul şi neutrino sunt *leptoni*.

Prin urmare, atomii sunt compuşi numai din quarci şi leptoni. Deşi nu apar în substanţa ordinară, alte două generaţii mai grele de quarci şi leptoni pot fi generate în ciocnirile de înaltă energie.

Este electronul compus şi el din altceva ? Dar un quarc ? Cu alte cuvinte, când se poate spune că o anume particulă *este compusă* din subparticule ?

Răspunsul la aceste întrebări este dat de următorul criteriu: *un obiect de masă m este compus dacă are extensie fizică superioară lungimii sale Compton*: $\lambda_C = h/(m \cdot c)$, unde $h \sim 6{,}6\times10^{-34}$ Js este constanta lui Planck, iar prin $c \sim 3\times10^{8}$ m/s s-a desemnat viteza luminii în vid.

Exemple:

- Electronul: diametru $< 4\times10^{-18}$ m; $\lambda_C \sim 2\times10^{-16}$ m; concluzie: *electronul nu este compus*;
- Quarcul up: diametru $< 1\times10^{-16}$ m; $\lambda_C \sim 1{,}5\times10^{-16}$ m; concluzie: *quarcul up nu este compus*;
- Protonul: diametru $\sim 2\times10^{-15}$ m; $\lambda_C \sim 2\times10^{-16}$ m; concluzie: *protonul este compus* (evident, din quarci).

Spre comparaţie, lungimea Compton a Galaxiei noastre, compuse, este de 10^{-85} m (evaluată doar prin calcul).

O importanţă deosebită pentru atom o prezintă *bozonii*, adică particulele de transport al forţelor de interacţiune. Astfel, protonii şi neutronii sunt menţinuţi împreună în nucleu prin intermediul *gluonilor* ce transportă forţa nucleară tare. Electronii sunt legaţi de nucleu prin intermediul *fotonilor* ce transportă forţa electromagnetică.

Masa totală vizibilă în Univers este de 10^{54} kg ($\lambda_C \sim 10^{-96}$ m). Cât este masa (de mişcare) a unui foton ? Câţi N fotoni „s-ar cuprinde” în masa vizibilă a Universului ?

Strict vorbind, masa unui foton nu poate fi considerată ca având valoare zero. Pe de altă parte, un foton cu lungime de undă Compton de ordinul dimensiunii Universului vizibil ($\lambda_C = 10^{26}$ m) nu poate fi distins de un foton cu masă zero ($\lambda_C \to \infty$) prin nici un experiment fizic. Acest rezultat conduce la o valoare a masei fotonului de cel mult 10^{-69} kg şi $N \sim 10^{123}$.

NUCLEUL ATOMIC

Nucleul atomului este o regiune foarte densă din centrul său, constând din protoni şi neutroni. Dimensiunea nucleului este mult mai mică decât dimensiunea atomului însuşi. Totuşi, masa unui atom este determinată în cea mai mare măsură doar de masa protonilor şi neutronilor şi aproape fără nici o contribuție din partea electronilor.

Dimensiunea nucleului

Raza unui nucleon (neutron sau proton) este de ordinul 1 fm = 10^{-15} m. Raza nucleară poate fi aproximată prin: $R = R_0 \cdot A^{1/3}$ unde A este numărul de masă şi $R_0 = 1{,}2$ fm.

Raza nucleului reprezintă 0,01% (1/10.000) din raza atomului. În felul acesta, densitatea nucleului este de 10^{12} ori mari mare decât densitatea atomului. Un cub solid cu latura de 1 mm umplut cu materie nucleară (nucleoni presați împreună) ar avea o masă de 200.000 tone. Doar stelele neutronice au asemenea densități.

Proprietățile nucleonilor

Nucleele atomice pot suferi transformări ce afectează numărul de protoni şi neutroni pe care îi conțin, proces numit *dezintegrare radioactivă*. Dacă transformările nucleelor au loc spontan, procesul se numeşte *radioactivitate*. Transformările radioactive au loc într-un număr mare de moduri, dar cele mai comune sunt *dezintegrarea alfa* (emisia unui nucleu de heliu) şi *dezintegrarea beta* (emisia unui electron). Dezintegrările ce implică electroni sau pozitroni sunt datorate *interacțiunilor nucleare slabe*.

În plus, ca şi electronii din atom, şi nucleonii din nucleu pot fi aduşi într-o stare excitată, de înaltă energie. Este adevărat, această tranziție cere de

sute de ori mai multă energie decât excitaţia electronilor. La revenirea în starea fundamentală, nucleul emite un foton de energie foarte înaltă, numit şi *radiaţie gamma*.

Transformările nucleare au loc de asemenea şi în cadrul aşa-numitelor reacţii nucleare: în fuziunea nucleară, două nuclee uşoare se unesc într-un singur nucleu, mai greu; în fisiunea nucleară, un nucleu greu se divide în două sau mai multe nuclee, eventual de mase apropiate.

Dezintegrarea nucleară

Un nucleu atomic este cu atât mai stabil cu cât energia medie de legătură dintre nucleoni este mai mare, situaţie ce se întâlneşte cu precădere la nucleele conţinând: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ... ("numere magice") protoni sau neutroni. Izotopul $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$, de exemplu, are 82 protoni şi 126 neutroni.

Atunci când raportul neutroni / protoni este fie prea mare, fie prea mic faţă de cel al numerelor magice, nucleul respectiv este instabil şi prezintă proprietatea naturală de a emite particule (dezintegrare nucleară) sau energie (dezexcitare nucleară) în vederea creşterii stabilităţii interne.

Prin urmare, dacă un nucleu are prea puţini sau prea mulţi neutroni, el poate fi instabil şi se va dezintegra după o perioadă de timp oarecare. De exemplu, la câteva secunde după ce au fost creaţi, atomii de $^{16}\mathrm{N}$ (7 protoni, 9 neutroni) se dezintegrează beta către atomi de $^{16}\mathrm{O}$ (8 protoni, 8 neutroni). În această dezintegrare, forţa nucleară slabă transformă un neutron din nucleul de azot într-un proton şi un electron. Elementul (atomul) se schimbă deoarece iniţial a avut şapte protoni, fapt pentru care era „azot”, iar acum are opt protoni, fapt pentru care este „oxigen”.

Multe elemente au izotopi care rămân stabili timp de săptămâni, ani sau miliarde de ani.

În studiul acestor transformări se utilizează următoarele noţiuni şi definiţii:

- Substanţele formate din atomi având nuclee instabile (atomi instabili) se numesc *radioactive*. Se mai folosesc şi noţiunile de atom radioactiv, respectiv, nucleu radioactiv sau radionuclid.
- Fluxul de particule sau de energie emis (radiat) de nucleul instabil se numeşte *radiaţie*.
- Procesul în care un nucleu instabil (radioactiv) emite particule sau energie se numeşte *dezintegrare radioactivă*.

Stările instabile ale nucleului sunt fie o caracteristică intrinsecă, şi avem de a face cu o *dezintegrare spontană*, fie provocate de cauze externe (ciocniri) şi avem de a face cu o *dezintegrare indusă*. În ambele cazuri sunt respectate legile de conservare: a energiei, a impulsului, a momentului cinetic şi a sarcinii electrice.

Dezintegrarea radioactivă fiind un fenomen statistic, se mai definesc:

- *Activitatea / radioactivitatea* (unei surse radioactive cuprinzând o anumită specie de atomi) ca fiind numărul de nuclee dezintegrate într-o secundă;
- *Timpul de înjumătățire*, ca fiind timpul în care se dezintegrează 50% dintr-un număr inițial de nuclee instabile (ale unei specii de atomi).

Unitatea de măsură pentru activitate este **Bq** (Bequerel). De obicei se indică cantitatea de substanță pentru a obține o activitate de 1 GBq = 10^{12} Bq, ca în exemplul următor:

^{28}Al	m = $9{,}0\times10^{-12}$ g	$T_{1/2}$ = 2,2 minute
^{131}I	m = $2{,}2\times10^{-7}$ g	$T_{1/2}$ = 8 zile
^{54}Mn	m = $3{,}5\times10^{-6}$ g	$T_{1/2}$ = 313 zile
^{137}Cs	m = $3{,}1\times10^{-4}$ g	$T_{1/2}$ = 30 ani
^{226}Ra	m = 0,03 g	$T_{1/2}$ = 1600 ani
^{232}Th	m = 247 kg	$T_{1/2} = 1{,}4\times10^{10}$ ani

În timpul unei dezintegrări radioactive se pot genera şi emite:

- Radiații α (alfa) = particule formate din doi protoni şi doi neutroni, echivalente cu un nucleu de He:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{231}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} \longrightarrow {}^{228}_{88}\mathrm{Ra} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Ru} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

- Radiații β (beta) = electroni e^- sau pozitroni e^+:

$$^{40}_{19}\mathrm{K} \longrightarrow {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + \mathrm{e}^{-}$$

$$^{214}_{82}\mathrm{Pb} \longrightarrow {}^{214}_{83}\mathrm{Bi} + \mathrm{e}^{-}$$

$$^{234}_{91}\mathrm{Pa} \longrightarrow {}^{234}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{e}^{-}$$

$$^{22}_{11}\mathrm{Na} \longrightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + \mathrm{e}^{-}$$

- Radiații γ (gamma) = energie sub formă de unde electromagnetice (fotoni):

$$^{198}_{79}\mathrm{Au} \xrightarrow[960\mathrm{keV}]{\mathrm{e}^{-}} {}^{198}_{80}\mathrm{Hg} \xrightarrow[411\mathrm{keV}]{\gamma} {}^{198}_{80}\mathrm{Hg}$$

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \xrightarrow[320\mathrm{keV}]{\mathrm{e}^{-}} {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} \xrightarrow[1{,}17\mathrm{MeV}]{\gamma} {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} \xrightarrow[1{,}33\mathrm{MeV}]{\gamma} {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$$

- Radiații *n* = neutroni:

$$\gamma + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Fiecare tip de radiație este caracterizat, la rândul său, prin energia cinetică înmagazinată, efectele de ionizare, adâncimea de pătrundere în diferite materiale, după cum urmează:

- Energia radiațiilor emise de radionuclizi variază între 1 keV şi câțiva MeV.
- La baza ionizării produsă de particulele α şi β se găseşte ciocnirea lor directă cu atomii mediului înconjurător, fiind mult mai intensă în cazul radiațiilor α, şi mai slabă pentru radiațiile β, pentru acelaşi nivel de energie înmagazinată. În aer, de exemplu, pe o distanță de 1 mm, o particulă α poate produce 5000 perechi de ioni, pe când o particula β doar 10 perechi. Ionizarea datorită radiațiilor γ se poate realiza prin: efect fotoelectric, efect Compton şi generare de perechi electron-pozitron. Dacă pentru

radiaţiile α, β şi γ ionizarea are la bază interacţiunea lor cu învelişul electronic al atomului "ţintă", în cazul ionizării produse de neutroni are loc o interacţiune direct cu nucleul atomului respectiv.

- Adâncimea de pătrundere depinde atât de energia radiaţiei incidente, cât, mai ales, de natura materialului "penetrat", fiind mai mică pentru radiaţiile α şi crescând pentru radiaţiile β, γ şi neutroni, în această ordine. În toate cazurile are loc o diminuare a intensităţii radiaţiilor odată cu străbaterea materialului respectiv, cea mai puternică fiind pentru particulele α. Astfel, în cazul plumbului, radiaţiile γ de 3 MeV pătrund aproximativ 15 mm, în timp ce radiaţiile β de aceeaşi energie dispar după 0,5 ÷ 1 mm. Comparativ, pentru apă, vom avea: 175 mm în cazul radiaţiilor γ şi 16 ÷ 17 mm pentru radiaţiile β (la 3 MeV).

În ceea ce priveşte interacţiunea neutronilor cu mediul înconjurător, aceasta depinde în primul rând de energia cinetică a particulelor. Din acest motiv se utilizează următoarea clasificare:

- neutroni rapizi, având energii peste 8 keV;
- neutroni lenţi, având energii sub 8 keV;
- neutroni termici, având energii până la 0,025 eV.

Principala sursă de neutroni este reacţia de fisiune a atomului de ^{235}U. La ciocnirea lui de către un neutron termic, atomul de ^{235}U fisionează, rezultând, în medie, 2,5 neutroni, fenomenul fiind însoţit de degajarea unei cantităţi însemnate de energie (sub formă de căldură şi radiaţii).

Neutronii se mai obţin din interacţiunea radiaţiilor γ de energii mai mari de 2,21 MeV cu nucleele de deuteriu şi se obţin aşa-numiţii *fotoneutroni*, sau, în cazul calibrării instrumentaţiei pentru neutroni, prin interacţiunea dintre radiaţiile α şi $^{9}_{4}Be$.

Interacţiunea dintre neutroni şi mediul înconjurător (mai exact, cu nucleul atomilor mediului) se numeşte *reacţie neutronică*.

Cele mai întâlnite reacţii neutronice sunt: fisiunea, împrăştierea elastică şi neelastică, reacţiile de activare.

Cele mai importante reacţii de activare sunt:

- reacția neutron - proton, indicată şi prin notația (*n*, *p*)

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{16}_{8}\mathrm{O}\longrightarrow^{16}_{7}\mathrm{N}+^{1}_{1}\mathrm{p}$$

- reacția neutron - particulă α, indicată şi prin notația (*n*, α)

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{10}_{5}\mathrm{B}\longrightarrow^{7}_{3}\mathrm{Li}+^{4}_{2}\mathrm{He}$$

- reacția neutron - radiații γ, indicată şi prin notația (*n*, γ)

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{1}_{2}\mathrm{H}\longrightarrow^{2}_{1}\mathrm{H}+\gamma$$

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow^{3}_{1}\mathrm{H}+\gamma$$

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{40}_{18}\mathrm{Ar}\longrightarrow^{41}_{18}\mathrm{Ar}+\gamma$$

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+^{238}_{92}\mathrm{U}\longrightarrow^{239}_{92}\mathrm{U}+\gamma$$

FISIUNEA NUCLEARĂ

Fisiunea nucleară, cunoscută şi sub denumirea de fisiune atomică, este un proces în care nucleul unui atom se scindează în două sau mai multe nuclee mai mici, numite *produşi de fisiune* şi, în mod uzual, un număr oarecare de particule individuale.

Aşadar, fisiunea este o formă de *transmutaţie* elementară.

Particulele individuale pot fi neutroni, fotoni (uzual sub formă de raze gamma) şi alte fragmente nucleare cum ar fi particulele beta şi alfa.

Fisiunea elementelor grele este o *reacţie exotermică* şi poate să elibereze cantităţi substanţiale de energie sub formă de radiaţii gamma şi energie cinetică a fragmentelor (încălzind volumul de material în care fisiunea are loc).

Fisiunea nucleară este folosită pentru a produce energie în Centralele Nuclearo-Electrice şi pentru fabricarea armelor nucleare.

Fisiunea este utilă ca sursă de energie (putere) deoarece unele materiale, numite *combustibili nucleari*, pe de o parte generează neutroni liberi ca „jucători" ai procesului de fisiune şi, pe de altă parte, li se iniţiază fisiunea la impactul cu (exact aceşti) neutroni liberi.

Prin urmare, combustibilii nucleari pot fi utilizaţi în *reacţii de fisiune nucleară în lanţ* autoîntreţinute, care eliberează energie în cantităţi controlate într-un reactor nuclear, sau necontrolate într-o armă nucleară.

Cantitatea de energie utilizabilă conţinută într-un combustibil nuclear este de milioane de ori mai mare decât energia utilizabilă conţinută într-o masă similară de combustibil chimic (benzină, de exemplu), acest lucru făcând fisiunea nucleară o sursă foarte tentantă de energie; totuşi produşii secundari ai fisiunii nucleare sunt puternic radioactivi, putând rămâne aşa chiar şi pentru mii de ani, având de a face cu importanta problemă a *deşeurilor nucleare*.

Preocupările privind acumularea deşeurilor şi imensul potenţial distructiv al armelor nucleare contrabalansează calităţile dezirabile ale

fisiunii ca sursă de energie, fapt ce dă naştere la intense dezbateri politice asupra problemei puterii nucleare.

Aspecte fenomenologice

Fisiunea nucleară diferă de alte forme de dezintegrare radioactivă prin aceea că ea poate fi amorsată şi controlată pe calea reacţiei în lanţ: neutronii liberi eliberaţi de fiecare eveniment de fisiune pot declanşa în continuare alte evenimente care, la rândul lor, eliberează mai mulţi neutroni ce pot determina şi mai multe fisiuni ş.a.m.d.

Izotopii chimici care pot să întreţină o reacţie de fisiune în lanţ se numesc combustibili nucleari şi se spune că sunt fisili. Cel mai comun combustibil nuclear este ^{235}U (izotopul uraniului cu masa atomică 235) şi ^{239}Pu (izotopul plutoniului cu masa atomică 239).

Aceşti combustibili se scindează în elemente chimice (produşi de fisiune) cu mase atomice apropiate de 100. Majoritatea combustibililor nucleari suferă fisiuni spontane extrem de rar, dezintegrându-se în principal prin reacţii alfa / beta timp de milenii.

Într-un reactor nuclear sau o armă nucleară, cele mai multe evenimente de fisiune sunt induse prin bombardament cu alte particule, de obicei neutroni.

Evenimentele tipice de fisiune eliberează câteva sute de MeV de energie pentru fiecare atom fisionat, acesta fiind şi motivul pentru care fisiunea nucleară este folosită ca sursă de energie.

Prin contrast, cele mai multe reacţii chimice de oxidare (cum ar fi arderea cărbunelui sau TNT) eliberează, în general, câteva zeci de eV per eveniment, astfel încât combustibilul nuclear conţine cel puţin de zece milioane de ori mai multă energie utilizabilă decât combustibilul chimic.

Energia fisiunii nucleare este eliberată ca energie cinetică a produşilor şi a fragmentelor de fisiune şi ca radiaţie electromagnetică sub formă de radiaţii gamma; într-un reactor nuclear energia este convertită în căldură prin ciocnirea acestor particule şi radiaţii cu atomii reactorului şi ai fluidului de răcire: apă sau apă grea.

Fisiunea nucleară a elementelor grele produce energie deoarece energia de legătură (pe unitatea de masă) a nucleelor cu numere şi mase atomice aflate între ^{61}Ni şi ^{56}Fe este mai mare decât energia specifică a nucleelor foarte grele, astfel încât diferenţa de energie este eliberată atunci când nucleele grele sunt scindate în bucăţi.

Masa totală a produşilor de fisiune dintr-o singură reacţie, după disiparea energiei lor cinetice, este mai mică decât masa iniţială a nucleelor combustibile. Excesul de masă Δm este asociat cu energia eliberată folosind relaţia lui Einstein $E = \Delta m \times c^2$.

Prin comparaţie, şi energia specifică de legătură a multor elemente uşoare (de la hidrogen până la magneziu) este de asemenea semnificativ mică, astfel încât dacă aceste elemente uşoare ar suferi o *reacţie de fuziune* (opusă fisiunii), procesul ar fi de asemenea exotermic (cu eliberare de energie).

Variaţia energiei specifice de legătură cu numărul atomic este datorată interacţiunii a două forţe fundamentale ce acţionează asupra nucleonilor dintr-un nucleu: protoni şi neutroni. Nucleonii sunt legaţi printr-o forţă nucleară tare, atractivă, care contrabalansează repulsia electrostatică dintre protoni.

Totuşi forţa nucleară tare acţionează numai pe distanţe extrem de scurte, întrucât se supune potenţialului Yukawa. Din această cauză nucleele mari sunt mai slab legate pe unitatea de masă decât nucleele mici şi scindarea unui nucleu mare în două sau mai multe nuclee cu dimensiuni intermediare eliberează energie. În practică, cea mai mare parte a acestei energii apare ca energie cinetică întrucât nuclee rezultate se resping şi se îndepărtează unele de altele cu viteză foarte mare.

În evenimentele de fisiune nucleară, nucleele se pot scinda în orice combinaţie de nuclee mai uşoare, dar cel mai comun eveniment este scindarea în nuclee de mase aproximativ egale, în jur de 120 uam (unităţi atomice de masă); funcţie de izotopi şi proces, cel mai comun eveniment este fisiunea asimetrică în care un nucleu rezultat are o masă de aproximativ 90 ÷ 100 uam şi celălalt nucleu de aproximativ 130 ÷ 140 uam.

Deoarece forţele nucleare tari acţionează pe distanţe mici, nucleele mari trebuie să conţină proporţional mai mulţi neutroni decât elementele uşoare, care sunt mult mai stabile, având un raport proton / neutron aproximativ unitar.

Neutronii suplimentari stabilizează elementele grele deoarece ele adaugă forţă de legătură tare fără a se compune cu forţa de repulsie proton-proton.

Produşii de fisiune au, în medie, aproximativ acelaşi raport de neutroni şi protoni ca şi nucleul „părinte” şi de aceea sunt în mod normal instabile (deoarece au în mod proporţional prea mulţi neutroni în comparaţie cu izotopii stabili de mase similare). Aceasta este cauza fundamentală a problemei deşeurile înalt radioactive din reactoarele nucleare.

Produşii de fisiune tind să fie emiţători beta, eliberând, sub acţiunea forţelor nucleare slabe, electroni rapizi în vederea conservării sarcinii electrice în urma transformării neutronilor excedentari în protoni, în interiorul nucleului produsului de fisiune.

Cei mai comuni combustibili nucleari, ^{235}U şi ^{239}Pu, nu sunt periculoşi radiologic prin ei înşişi: ^{235}U are timpul de înjumătăţire de aproximativ 700 milioane de ani, evenimentele spontane de dezintegrare fiind extrem de rare; chiar dacă ^{239}Pu are timpul de înjumătăţire de aproape 24.000 ani, el este un emiţător de particule alfa şi, deci, nepericulos atâta timp cât nu este ingerat.

După „arderea" combustibilului nuclear, materialul combustibil rămas este intim mixat cu produşi de fisiune puternic radioactivi, care emit particule beta energetice şi radiaţii gamma.

Unii produşi de fisiune au timpi de înjumătăţire de ordinul secundelor; alţii au timpi de înjumătăţire de ordinul zecilor sau sutelor de ani, cerând facilităţi deosebite de stocare până la dezintegrarea lor în produşi stabili, neradioactivi.

Fisiunea spontană şi fisiunea indusă; reacţii în lanţ

Multe elemente grele, cum ar fi uraniu, toriu şi plutoniu, suferă ambele tipuri de fisiuni: fisiunea spontană, ca o formă a dezintegrării radioactive şi fisiunea indusă, o formă a reacţiei nucleare. Izotopii elementari care fisionează când sunt loviţi de un *neutron liber (neutron rapid)* se numesc *fisionabili*; izotopii care fisionează când sunt loviţi cu *neutroni lenţi (neutroni termici)* sunt numiţi *fisili*. Câţiva fisili particulari şi izotopii uşor de obţinut (ca ^{235}U şi ^{239}Pu) se numesc combustibili nucleari deoarece ei pot să întreţină o reacţie în lanţ şi pot fi obţinuţi în cantităţi destul de mari pentru a fi utilizaţi.

Toţi izotopii fisionabili şi fisili suferă şi un număr mic de fisiuni spontane care eliberează un număr mic de neutroni liberi (rapizi) în interiorul eşantionului de combustibil nuclear.

Neutronii emişi rapid din combustibil devin neutroni liberi, cu un timp de înjumătăţire de aproape 15 minute înainte să se dezintegreze în protoni şi radiaţii beta.

În mod normal, neutronii se ciocnesc cu şi sunt absorbiţi de alte nuclee din vecinătate, înainte ca dezintegrarea lor să se realizeze. Totuşi, unii neutroni vor lovi nuclee combustibile şi vor induce noi fisiuni, eliberându-se astfel şi mai mulţi neutroni.

Dacă se dispune de o cantitate (concentrație) suficientă de combustibil nuclear, sau dacă numărul de neutroni eliberați este suficient de mare, atunci neutronii proaspăt emişi sunt mai mulți decât neutronii pierduți şi poate să aibă loc întreținerea unei reacții nucleare în lanț.

Concentrația de combustibil care permite întreținerea unei reacții nucleare în lanț se numeşte *concentrație critică*; dacă concentrarea de material este formată în totalitate de nuclee de combustibil avem de a face cu *masa critică*.

Cuvântul „critic" se referă la extremul unei ecuații diferențiale care guvernează numărul de neutroni liberi prezenți în combustibil; dacă sunt mai puțini decât masa critică, atunci numărul de neutroni este determinat de dezintegrarea radioactivă; dar dacă sunt mai mulți neutroni sau cel puțin masa critică, atunci numărul neutronilor este controlat mai degrabă de fizica reacției în lanț. Valoarea masei critice a unui combustibil nuclear depinde puternic de geometrie şi materialele ambiante (înconjurătoare).

Nu toți izotopii fisionabili pot întreține o reacție în lanț. De exemplu, ^{238}U, cel mai abundent izotop al uraniului, este fisionabil dar nu fisil: el suferă fisiuni induse când este lovit de un neutron energetic cu o energie cinetică de peste 1 MeV.

Dar prea puțini neutroni produşi de fisiunea ^{238}U sunt suficient de energetici pentru a induce o următoare fisiune în ^{238}U, astfel încât nu este posibilă o reacție în lanț pentru acest izotop. În schimb, bombardând ^{238}U cu neutroni termici există posibilitatea ca aceştia să fie absorbiți, obținându-se ^{239}U, izotop care se dezintegrează prin emisie beta către ^{239}Pu; acest proces este folosit pentru a obține ^{239}Pu în reactoarele regeneratoare, dar nu contribuie la reacția nucleară în lanț.

Izotopii fisionabili dar nefisili pot fi folosiți ca sursă de energie de fisiune fără reacție în lanț. Bombardând ^{238}U cu neutroni rapizi se induc fisiuni şi se degajă energie atâta timp cât este prezentă sursa de neutroni. Acest efect este folosit pentru creşterea energiei eliberate de armele termonucleare, prin blindarea bombelor cu ^{238}U ce interacționează cu neutronii eliberați de fuziunea nucleară din centrul bombei.

Reactoare de fisiune

Reactoarele cu fisiune critică reprezintă cel mai comun tip de reactor nuclear. Într-un astfel de reactor, neutronii produşi de fisionarea atomilor combustibilului sunt folosiți pentru a induce, în continuare, alte fisiuni şi pentru a menține controlul cantității de energie eliberată. Reactoarele în care

se produc fisiuni dar nu fisiuni autoîntreținute se numesc reactoare de fisiune subcritice. Pentru declanşarea fisiunii în acest tip de reactoare se folosesc fie alte dezintegrări radioactive, fie acceleratoare de particule.

Reactoarele cu fisiune critică sunt construite pentru trei scopuri principale care, în general, presupun metode diferite de exploatare a căldurii şi a neutronilor produşi prin reacția de fisiune în lanț:

- *Reactoarele de putere*, gândite să producă căldură, indiferent dacă ele fac parte din centrale terestre sau din sistemele de putere de pe vapoare şi submarine nucleare;
- *Reactoarele de cercetare*, gândite să producă neutroni şi / sau să activeze surse radioactive destinate cercetărilor ştiințifice, medicale, inginereşti etc.;
- *Reactori reproducători*, gândiți să producă combustibili nucleari în masă plecând de la alți izotopi mai abundenți; cel mai cunoscut reactor de acest tip creează ^{239}Pu (combustibil nuclear) din izotopul natural foarte abundent ^{238}U (nu este combustibil nuclear).

Deşi, în principiu, orice reactor de fisiune poate să funcționeze în toate cele trei moduri, în practică fiecare reactor este construit numai pentru una dintre aceste trei sarcini. (Contraexemplu: reactorul N de la Hanford, în prezent dezafectat).

Reactoarele de putere convertesc energia cinetică a produşilor de fisiune în căldură utilizată la încălzirea unui fluid de lucru care, la rândul său, este trecut printr-un motor termic ce generează energie (putere) mecanică sau electrică. Fluidul de lucru este, în mod uzual, apa într-o turbină cu aburi, dar unele reactoare folosesc şi gaze: heliu, azot, bioxid de carbon etc.

Reactoarele de cercetare produc neutroni care sunt folosiți în diferite moduri, căldura de fisiune fiind tratată ca un deşeu inevitabil.

Reactoarele reproducătoare sunt specializate din reactoarele de cercetare cu mențiunea că materialul ce urmează a fi iradiat este combustibilul însuşi (un amestec de ^{238}U şi ^{235}U).

REACȚIA DE FISIUNE ÎN LANȚ

Schematic, o reacție de fisiune nucleară în lanț ar putea fi restrânsă la următoarele trei secvențe:

- Un atom de ^{235}U absoarbe un neutron şi se scindează în doi atomi mai uşori (fragmente de fisiune), eliberând trei neutroni şi o oarecare cantitate de energie de legătură.
- Unul din aceşti neutroni este absorbit de un atom de ^{238}U şi nu mai participă, în continuare, la reacție. Al doilea neutron este pur şi simplu pierdut în mediul / materialul înconjurător, nu se mai ciocneşte cu alți atomi de uraniu, fapt pentru care nici el nu mai participă la continuarea reacției. Al treilea neutron se ciocneşte cu un atom de ^{235}U care se scindează şi eliberează doi neutroni şi, din nou, energie de legătură.
- Ultimii doi neutroni se ciocnesc fiecare cu câte un atom de ^{235}U care se scindează şi eliberează de la unu la trei neutroni ce pot continua reacția.

O reacție nucleară în lanț apare atunci când, în medie, cel puțin o reacție nucleară este cauzată de o reacție nucleară anterioară, acest lucru putând conduce la o creştere exponențială a numărului de reacții nucleare.

O reacție în lanț necontrolată în interiorul unei cantități suficiente de combustibil de fisiune (masă critică) poate să conducă la o eliberare explozivă de energie, acesta fiind, de altfel, modul de funcționare al armelor nucleare.

Reacția în lanț poate fi, însă, controlată în mod adecvat şi folosită ca sursă de energie în reactoarele nucleare.

Intuitiv, ecuațiile de fisiune s-ar putea scrie:

^{235}U + 1 neutron = fragmente de fisiune +2,52 neutroni + 189 MeV
^{239}Pu + 1 neutron = fragmente de fisiune +2,95 neutroni + 200 MeV

Nu s-au luat în calcul cei 10 MeV corespunzând greu-detectabililor (şi inutilizabililor) neutrini.

Când un atom greu suferă o fisiune nucleară, acesta se scindează în două sau mai multe fragmente de fisiune. Fiecare dintre aceste fragmente de fisiune este un atom al unui mult mai uşor element din tabelul periodic al elementelor.

Prin urmare, un neutron poate să cauzeze o reacție de fisiune nucleară care eliberează aproximativ 2,5 sau 3 neutroni. Crucial este câți dintre aceştia cauzează, la rândul lor, alte fisiuni nucleare. Factorul efectiv de multiplicare a neutronilor, *k*, este numărul mediu de neutroni din aceşti 2,5 sau 3 care cauzează reacția de fisiune, în opoziție cu neutronii produşi de fisiune care sunt absorbiți fără să mai cauzeze o nouă fisiune şi cei pierduți (care părăsesc sistemul).

Timpul mediu de generare este timpul mediu scurs de la emisia neutronului până la captura de fisiune. Acest timp este foarte scurt: distanța parcursă este aproape cât diametrul masei critice; viteza poate fi de aproximativ 10.000 km/s şi distanța de 10 cm, astfel încât timpul este de ordinul 10 ns.

Putem distinge următoarele cazuri:

- $k < 1$ (masă subcritică):

Plecând cu o fisiune, avem în medie un total de 1/(1-k) fisiuni. Orice început de reacție în lanț se stinge imediat.

- $k = 1$ (masă critică):

Plecând cu un neutron liber, valoarea medie a numărului de neutroni liberi rezultați este 1 în orice moment de timp; în timp există o oarecare probabilitate ca reacția în lanț să se stingă, fapt compensat prin existența, în fiecare moment de timp, a mai multor neutroni.

- $k > 1$ (masă supercritică):

Plecând cu un neutron liber, există probabilitatea nebanală ca acesta să nu cauzeze o fisiune, sau ca un început de reacție în lanț să se stingă. Totuşi, din moment ce numărul neutronilor liberi este destul de mare, este foarte probabil ca numărul lor să crească exponențial.

Atât numărul de neutroni prezenți în agregat (şi astfel rata instantanee a reacției de fisiune) cât şi numărul de fisiuni apărute din

momentul începerii reacției sunt proporționali cu $e^{(k-1)\,t/g}$, unde g este timpul mediu de generare iar t este timpul scurs.

Desigur, aceasta nu poate continua prea mult timp: k descreşte când cantitatea rămasă de material de fisiune descreşte; la fel, geometria şi densitatea se modifică şi ele: geometria se modifică în mod radical atunci când materialul de fisiune rămas este rupt în bucăți, sau, în alte circumstanțe, topit şi curgând aiurea etc.

Atunci când k este aproape de 1, acest calcul supraestimează, cumva, „rata de dublare".

Când nucleul de uraniu absoarbe un neutron el intră într-o stare excitată de durată foarte scurtă, care dispare apoi pe mai multe căi posibile. În mod tipic, nucleul se dezintegrează în două fragmente (produşi de fisiune), de obicei izotopi de iod şi cesiu, cu expulzarea unui număr de neutroni. Produşii de fisiune sunt ei înşişi instabili, cu durate de viață mai lungi sau mai scurte, tipic de ordinul câtorva secunde, şi se dezintegrează producând neutroni suplimentari.

În mod uzual, populația de neutroni emişi se împarte în două categorii: *neutroni prompți* şi *neutroni întârziați*. Procentul neutronilor întârziați este mai mic de 1% din total.

Într-un reactor nuclear, pentru a avea un proces stabil, valoarea k trebuie să fie în jur de 1.

Când se atinge valoarea $k = 1$ luând în calcul *toți* neutronii obținuți prin fisiune, reacția se numeşte *critică*. Aceasta este situația atinsă într-un reactor nuclear. Acum modificările de putere sunt mici şi controlabile cu ajutorul barelor de control.

Când valoarea $k = 1$ se obține luând în calcul numai neutronii prompți, reacția se numeşte *prompt-critică* – poate să apară o rată de dublare mult mai mică, depinzând de criticitatea de exces ($k - 1$).

Modificarea de reactivitate necesară pentru a trece de la *critică* la *prompt-critică* (adică fracția de neutroni întârziați) este definită ca „un dolar".

Valoarea lui k este sporită de reflectorul de neutroni care înconjoară materialul fisil şi de asemenea este sporită prin creşterea densității materialului fisil: pe fiecare centimetru parcurs, probabilitatea de ciocnire dintre un nucleu şi un neutron este proporțională cu densitatea, în timp ce distanța parcursă înainte de părăsire a sistemului este doar redusă de rădăcina cubică a densității.

Probabilitatea unei reacții în lanț

Să presupunem că o fisiune a fost cauzată de ciocnirea dintre un neutron şi un nucleu şi a produs 3 neutroni. În plus, să presupunem $k > 1$.

Probabilitatea ca un neutron să cauzeze o nouă fisiune este $k/3$.

Probabilitatea ca un neutron liber să nu cauzeze o reacție în lanț este $(1-k/3)$ (nici o fisiune) plus probabilitatea de a avea a cel puțin o fisiune, atâta timp cât nici unul dintre cei trei neutroni produşi nu cauzează o reacție în lanț.

Ultima are valoarea de k/3 înmulțit cu cubul primei probabilități menționate, că un neutron liber nu cauzează o reacție în lanț.

Această ecuație poate fi rezolvată uşor şi se găseşte că probabilitatea unei reacții în lanț este $1{,}5 - 0{,}5\sqrt{(12/k) - 3}$ care variază de la 0 pentru $k =$ 1, la 1 pentru $k = 3$.

Pentru valori ale lui k puțin mai mari decât 1, probabilitatea unei reacții în lanț ajunge la valoarea: $\sim k - 1$.

COMBUSTIBILI NUCLEARI

Analog combustibilului chimic care este ars pentru a obține energie, *combustibil nuclear* este orice material care poate fi consumat pentru a obține energie electrică.

Cel mai comun tip de combustibil nuclear este reprezentat de elementele fisile grele care pot fi supuse reacției de fisiune în lanț într-un reactor nuclear; denumirea de combustibil nuclear se poate referi atât la materialul combustibil cât şi la obiectele fizice compuse din material combustibil (de exemplu fasciculele combustibile formate din bare / elemente combustibile).

Cei mai des utilizați combustibili nucleari fisili sunt ^{235}U şi ^{239}Pu, iar activitățile de: extragere din mină, măcinare, purificare, utilizare şi, în final, depozitare formează la un loc aşa-numitul: *ciclul combustibilului nuclear*; ciclul combustibilului nuclear este important prin relevanța sa în generațiile de Centrale Nuclearo-Electrice (CNE) şi arme nucleare.

Nu toți combustibilii nucleari sunt folosiți în reacții de fisiune în lanț. De exemplu, ^{238}Pu este folosit pentru a produce energie în cantități mici prin dezintegrare radioactivă în generatoarele radiotermale sau pile atomice. Izotopii uşori, cum ar fi ^{3}H (tritiu), sunt folosiți în reacțiile de fuziune nucleară.

Combustibili sub formă de oxizi

Conductivitatea termică a bioxidului de uraniu este mică şi este afectată de porozitate şi gradul de ardere. Arderea presupune: formarea produşilor de fisiune care încep să se dizolve în rețeaua cristalină (cum ar fi lantanidele), precipitarea produşilor de fisiune cum ar fi paladiul, formarea bulelor de gaz de fisiune ca în cazul xenonului sau kriptonului, pericolul iradierii rețelei cristaline.

Conductivitatea termică scăzută poate cauza supraîncălzirea părții centrale a pastilei de combustibil. Porozitatea conduce la descreşterea conductivității termice a combustibilului şi la umflarea acestuia pe durata utilizării.

- UOX (Uranium dioxide)

Bioxidul de uraniu este un solid semiconductor de culoare neagră. Poate fi obținut prin reacția dintre nitrat de uranil cu o bază (amoniac) pentru a forma un solid (uranat de amoniu). Acesta este încălzit (calcinat) pentru a forma U_3O_8 ce poate fi convertit prin încălzire în atmosferă mixtă de argon şi hidrogen (700 ^oC) în UO_2. La rândul său, UO_2 este amestecat cu liant organic şi presat sub formă de pastile ce sunt, apoi, sinterizate în structură solidă. Scopul este de a forma un solid dens cu puțini pori. Conductivitatea bioxidului de uraniu este foarte mică în comparație cu cea a zirconiului metalic şi scade când temperatura creşte. Trebuie notat că fenomenul de coroziune a bioxidului de uraniu în mediu apos este controlat prin procese electrochimice similare coroziunii galvanice a suprafețelor metalice.

- MOX (Mixed oxide)

Combustibilul MOX este un amestec de plutoniu şi uraniu natural sau uraniu sărăcit, având comportare similară (dar nu identică) cu uraniul îmbogățit. Combustibilul MOX este o alternativă la combustibilul cu uraniu slab îmbogățit (LEU) folosit în reactoarele cu apă uşoară care predomină actuala generație de CNE. Utilizarea combustibilului MOX aduce în discuție problema că acesta este, prin el însuşi, o sursă de surplus de plutoniu obținut prin transmutație. Reprocesarea curentă a combustibilului din CNE pentru a fabrica combustibil de tip MOX are loc în Anglia, Franța şi într-o măsură mai mică în Rusia, India şi Japonia. China are planificat să dezvolte reactori rapizi reproducători şi, respectiv, tehnologii de reprocesare.

Combustibili metalici

Combustibilii metalici au avantajul unei mult mai ridicate conductivități termice decât cea a combustibililor sub formă de oxizi, dar şi dezavantajul că nu pot supraviețui în aceeaşi măsură temperaturilor înalte.

- Combustibil TRIGA

Combustibilul TRIGA este folosit în reactoare TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics). Acest tip de combustibil constă dintr-o matrice uraniu – zirconiu – hidrură. El prezintă un grad sporit de siguranță prin aceea că dacă se găsește la temperatură înaltă, secțiunea transversală a hidrogenului din combustibil este schimbată la energii înalte, permițând pierderea de mai mulți neutroni, respectiv termalizarea unui număr mai mic de neutroni. Multe reactoare care folosesc combustibil TRIGA au miezuri cu „pierderi mari", neutronii pierduți în exces putând fi utilizați pentru cercetare.

- Combustibilul cu actinide

Într-un reactor cu neutroni rapizi, actinidele minore produse prin captură de neutroni în uraniu şi plutoniu, pot fi folosite pe post de combustibil. Combustibilul metalic cu actinide este, în mod tipic, un aliaj de zirconiu, uraniu, plutoniu şi actinide minore. El poate fi făcut sigur din start prin aceea că expansiunea termică a aliajului de metal va duce la creşterea pierderilor de neutroni.

Combustibili ceramici şi lichizi

- Combustibili ceramici

Combustibilii ceramici au avantajul unei înalte conductivități termice şi punct de topire ridicat, dar au tendința să se umfle mai mult decât combustibilul sub formă de oxizi şi sunt mai puțin înțeleşi bine.

Nitrura de uraniu: acesta este combustibilul folosit adesea în reactoarele proiectate de NASA, un avantaj fiind acela că nitrura de uraniu are o conductivitate termică mai bună decât UO_2.

Nitrura de uraniu are un punct de topire foarte înalt. Acest combustibil are dezavantajul că, întrucât s-a folosit ^{15}N (în loc de mult mai comunul ^{14}N), se poate genera o cantitate mare de ^{14}C printr-o reacție de tip (n, p). Deoarece azotul cerut pentru un astfel de combustibil este foarte scump este clar că şi combustibilul este reprocesat pentru a recupera ^{15}N.

Carbura de uraniu: cele mai multe cunoştințe despre carbura de uraniu se referă la elementul combustibil de tip „creion" destinat reactorilor rapizi reproducători şi studiați intens în perioada anilor 1960-1970. Totuşi,

recent a renăscut interesul pentru carbura de uraniu, cel mai notabil fiind combustibilul sub formă de particule (cum ar fi particulele TRISO).

Conductivitatea termică înaltă şi punctul înalt de topire transformă carbura de uraniu într-un combustibil atractiv.

În plus, datorită lipsei oxigenului din acest tip de combustibil (în general, suprapresiunea din combustibili este cauzată de formarea de O_2 şi alte gaze în prezența radiațiilor) şi posibilității de a-l îngloba în straturi de asemenea ceramice (interfața ceramică-ceramică prezintă unele avantaje structurale şi chimice), carbura de uraniu poate fi un candidat ideal de combustibil pentru reactoarele din Generația a IV-a, cum ar fi reactoarele rapide răcite cu gaz (GFR).

- Combustibili lichizi

Săruri anhidre topite: acestea includ combustibilii dizolvați în agentul de răcire. Ei au fost folosiți în reactoarele cu săruri topite, cel mai adesea sub forma de LiF-BeF_2-ThF_4-UF_4 (72-16-12-0.4 mol%), operând la temperaturi de 705 ºC sau mai mari, cunoscut fiind faptul că punctul de fierbere al topiturii este mai mare de 1400 ºC.

Soluții apoase ale sării de uranil: reactoarele omogene apoase folosesc o soluție de sulfat de uranil (sau altă sare de uraniu) în apă. Acest tip de reactor omogen nu a fost folosit ca reactor de putere. Unul din dezavantajele sale este că, în caz de accident, combustibilul se poate dispersa foarte uşor.

Tipuri comune de combustibili nucleari

Pentru utilizarea sub formă de combustibil nuclear, florura (îmbogățită) de uraniu, UF_6, este convertită în pudră de bioxid de uraniu, UO_2, care este procesată sub formă de pastile.

Pastilele sunt sinterizate în structuri ceramice solide de uraniu (îmbogățit). Pastilele sunt apoi introduse, funcție de proiectul fiecărui miez de reactor, în tuburi din aliaje de metale rezistente la coroziune.

Tuburile sunt etanşate şi se numesc elemente combustibile. Mai multe elemente combustibile sunt grupate în structuri speciale numite fascicule combustibile, folosite la încărcarea miezului reactorului.

Metalul folosit pentru tuburi depinde de proiectul de reactor; în trecut s-a utilizat oțel inoxidabil, dar cele mai multe reactoare folosesc acum aliaj din zirconiu.

Pentru cele mai comune tipuri de reactoare (BWR şi PWR) tuburile sunt asamblate în fascicule la distanțe bine precizate. Aceste fascicule primesc un număr de identificare unic ce permite urmărirea lor pe traseul: fabricație – utilizare – depozitare finală.

- Combustibilul PWR

Combustibilul utilizat în reactorul cu apă sub presiune (Pressurized Water Reactor = PWR) constă din elemente cilindrice montate în fascicule.

Se folosesc pastile ceramice de oxid de uraniu uşor îmbogățit, introduse în tuburi de zircaloy având diametre de aproximativ 1 cm, acestea din urmă fiind apoi umplute cu heliu pentru a îmbunătăți transferul de căldură dinspre combustibil către teacă. Într-un fascicul combustibil se montează câte 179-264 de elemente combustibile, iar în miezul reactorului se introduc între 121 şi 193 de fascicule. În general, fasciculele combustibile sunt montate sub formă de matrice pătratice 14×14 sau 17×17 de elemente combustibile şi au 4 m lungime.

- Combustibilul BWR

În reactorul cu apă în fierbere (Boiling Water Reactor = BWR), combustibilul este similar celui de tip PWR cu excepția că fasciculele sunt „ambalate”. Mai exact, fiecare fascicul combustibil este învelit într-o „cămaşă” subțire. Acest lucru este destinat prevenirii unor variații locale de densitate față de starea globală a neutronicii şi termohidraulicii miezului. Într-un fascicul combustibil BWR sunt aproximativ 500 ÷ 800 de elemente combustibile. Fiecare element combustibil este umplut cu heliu la o presiune de aproximativ 3 atmosfere (300 kPa).

- Combustibilul CANDU

Fasciculele combustibile de tip CANDU au aproximativ 0,5 m lungime şi 10 cm în diametru. Sunt formate din pastile sinterizate de UO_2 (uraniu natural) introduse în tuburi de zirconiu, închise etanş şi sudate pe grile de capăt. Fiecare fascicul are în jur de 20 kg, iar în miezul reactorului CANDU se introduc cam 4.500 de fascicule.

Cele mai tipice fascicule actuale au câte 37 de elemente combustibile identice aranjate într-o structură radială în jurul axei longitudinale (în trecut s-au folosit şi alte combinații geometrice şi număr de elemente combustibile).

Fasciculul CANFLEX (0.5 m lungime, 10 cm diametrul, 20 kg masă) are 43 de elemente şi înlocuieşte fasciculul standard cu 37 de elemente. Proiectul actual de fascicul CANDU nu necesită uraniu îmbogăţit datorită mult mai eficientului moderator – apă grea, totuşi, unele concepte noi se îndreaptă către un combustibil uşor îmbogăţit pentru a uşura reducerea dimensiunilor rectorului.

Tipuri mai puţin comune de combustibili nucleari

În unele aplicaţii specifice se folosesc alte diferite forme de combustibil nuclear, dar nu în cantităţile specifice atât de răspândiţilor combustibili BWR, PWR şi CANDU. Multe dintre aceste tipuri speciale se găsesc numai în reactoarele de cercetare sau în aplicaţii militare.

- Combustibilul TRISO

Combustibilul izotopic tristructural (Tristructural-isotropic = TRISO) este un tip de microparticule combustibile.

Constă dintr-un nucleu compus din oxid de uraniu UO_n (uneori UC sau UCO), îmbrăcat într-o manta de patru straturi de materiale izotopice. Cele patru straturi sunt formate, dinspre centru spre exterior: din carbon (poros), carbon pirolitic (PyC) dens, ceramică (SiC) pentru a reţine produşii de fisiune la temperaturi înalte şi pentru a da combustibilului TRISO mai multă integritate structurală şi, din nou, PyC dens.

Particulele combustibile TRISO sunt proiectate să nu se fisureze (să nu se spargă) astfel încât pot să păstreze combustibilul în interiorul reactorului chiar şi în cel mai rău scenariu de accident nuclear.

Două astfel de proiecte sunt: reactorul modular cu strat granular (Pebble Bed Modular Reactor = PBMR), în care particulele combustibile sunt disipate într-un strat (pat) de grafit, respectiv reactorul prismatic răcit cu gaz (cum ar fi GT-MHR) în care particulele combustibile TRISO sunt plasate compact în blocuri (matrice) de grafit.

Ambele tipuri sunt reactoare de înaltă temperatură răcite cu gaz (High-Temperature Gas-cooled Reactor = HTGR), care fac parte din clasa reactoarelor de foarte înaltă temperatură (Very High Teperature Reactor = VHTR) specifice proiectelor de reactoare din Generaţia a IV-a.

Particulele combustibile TRISO au fost dezvoltate iniţial în Germania pentru reactoare HTGR. Primul reactor care a folosit combustibil TRISO a fost AVR şi prima CNE a fost THTR-300. În prezent,

combustibilul TRISO a început să fie folosit în reactoare experimentale, HTR-10 în China şi HTTR în Japonia.

- Combustibilul RBMK

Combustibilul RBMK a fost folosit în proiectele sovietice de reactoare cu oxid de uraniu slab îmbogăţit. Elementele combustibile sunt foarte lungi, de aproximativ 7 m. Centrala Nuclearo-Electrică de la Cernobîl avea un reactor RBMK de 1 GWe.

- Combustibilul CerMet

Combustibilul CerMet constă din particule de combustibil (uzual oxid de uraniu) încorporat într-o matrice de metal.

Se pare că acest tip de combustibil este folosit în reactoarele militare ale US Navy (submarine).

Are caracteristici performante privind transferul de căldură şi poate suporta dilatări mari fără a prezenta pericol în utilizare.

- Combustibilul de tip placă

Combustibilul de tip placă a ieşit de mulţi ani din atenţia reactoriştilor. El este folosit în acest moment numai în reactorul avansat de testare (Advanced Test Reactor = ATR) de la Idaho National Laboratory.

Combustibili cu dezintegrare de radioizotopi

- Bateria cu radioizotopi

Termenii de baterie atomică, baterie nucleară şi baterie cu radioizotopi sunt folosiţi pentru a descrie un dispozitiv care utilizează dezintegrarea radioactivă pentru a genera electricitate. Este vorba, în general, de conversiile non-termice, a căror putere de ieşire nu depinde (nu este funcţie) de diferenţa de temperatură.

Există câteva proiecte ce exploatează particulele alfa şi beta. Acestea includ: generatoarele cu încărcare directă (direct charging generators); bateriile beta-voltaice; bateria nucleară optoelectrică şi generatorul piezoelectric cu radioizotopi.

Aceste sisteme folosesc radioizotopi care produc particule beta de joasă energie sau unele particule alfa de diferite energii. Particulele beta de joasă energie sunt necesare pentru a preveni radiația penetrantă de înaltă energie Bremsstrahlung care ar cere ecrane grele de protecție.

Au fost testați radioizotopi precum tritiu, nichel-63, promețiu-147 şi tecnețiu-99. S-au folosit, de asemenea, plutoniu-238, curium-242, curium-244 şi stronțiu-90.

- Generatoare termoelectrice cu radioizotopi

Un generator termoelectric cu radioizotopi (Radioisotope Thermoelectric generator = RTG) este un generator electric simplu, care îşi obține energia din dezintegrarea radioactivă.

Într-un astfel de dispozitiv, căldura eliberată prin dezintegrarea unui material radioactiv este convertită în electricitate folosind o rețea de termocuple.

Cel mai indicat material radioactiv folosit într-un RTG este ^{238}Pu, sub formă de bioxid de plutoniu, care are timpul de înjumătățire de 87,7 ani, o densitate de energie rezonabilă şi nivele excepțional de joase în ce priveşte radiațiile gamma şi de neutroni.

Unele RTG ruseşti au folosit ^{90}Sr; acest izotop are un timp de înjumătățire mult mai scurt, o densitate de energie mai mică, dar este mult mai ieftin.

Mai vechile RTG, primele fabricate în 1958 de US Atomic Energy Commission, au folosit ^{210}Po. Acest combustibil oferă densități de energie fenomenal de mari (un singur gram de ^{210}Po generează 140 W termici).

Totuşi, radioizotopul ^{210}Po are utilizare limitată datorită timpului său de înjumătățire foarte scurt şi producției de radiații gamma, fapt pentru care, de altfel, a şi fost scos din uz în această aplicație.

- Unități de încălzire cu radioizotopi

Unitățile de încălzire cu radioizotopi (Radioisotope Heater Unit = RHU) asigură în jur de 1 W de căldură, obținută din dezintegrarea câtorva grame de ^{238}Pu.

Sarcina unei RHU este să asigure o încălzire perfect localizată a unui echipament senzitiv în spațiu extraterestru.

Stația Cassini-Huygens care orbitează planeta Saturn conține 82 astfel de unități (împreună cu alte 3 RTG principale folosite pe post de generatoare de energie).

Sonda Hygens trimisă spre Titan conține 35 de astfel de sisteme.

REACTORUL NUCLEAR DE FISIUNE

Reactorul nuclear de fisiune[3] este o instalație în care este inițiată o reacție nucleară în lanț, controlată şi menținută la o rată staționară (în opoziție cu o bombă nucleară, în care reacția în lanț apare într-o fracțiune de secundă şi este complet necontrolată).

Reactoarele nucleare sunt folosite pentru numeroase scopuri. Cea mai semnificativă utilizarea curentă este pentru generarea de energie electrică. Reactoarele de cercetare sunt folosite pentru producerea de izotopi şi pentru experimente cu neutroni liberi. Din punct de vedere istoric, prima folosire a reactoarelor nucleare a fost producerea plutoniului pentru bomba atomică. O altă utilizare militară este propulsia submarinelor şi a vapoarelor, deşi aceasta presupune un reactor mult mai mic decât cel folosit într-o Centrală Nuclearo-Electrică (CNE).

În mod curent, toate reactoarele nucleare comerciale sunt bazate pe fisiunea nucleară şi sunt considerate problematice datorită siguranței lor şi a riscurilor asupra sănătății. Din contra, alții consideră centrala nucleară ca fiind o metodă sigură şi nepoluantă de generare a electricității.

Instalația de fuziune este o tehnologie bazată pe fuziunea nucleară în locul fisiunii nucleare.

Există şi alte instalații în care au loc reacții nucleare într-o manieră controlată, incluzând generatoarele termoelectrice radioizotope şi bateriile atomice, care generează căldură şi putere exploatând dezintegrările radioactive pasive, cum ar fi, de exemplu, instalațiile Farnswoth-Hirsch de producere a radiațiilor neutronice.

[3] Peste tot în această lucrare, prin sintagma *reactor nuclear* s-a făcut referință exclusiv la *reactorul nuclear de fisiune.*

Aplicații

- În centrale nucleare, pentru:
  - obținerea căldurii şi generarea de electricitate;
  - obținerea de căldură pentru încălzire domestică şi industrială;
  - producție de hidrogen;
  - desalinare;

- În propulsie nucleară şi anume:
  - propulsie nucleară marină;
  - propuneri pentru rachete propulsate termonuclear;
  - propuneri pentru rachete propulsate prin puls nuclear;

- În transmutație de elemente, pentru:
  - producția de plutoniu, adesea pentru utilizarea în arme nucleare;
  - obținerea diverşilor izotopi radioactivi, cum ar fi americiu pentru detectorii de fum, respectiv ^{60}Co, ^{99}Mo şi alții, folosiți în medicină;

- În cercetare, incluzând:
  - asigurarea unei surse de radiație cu neutroni şi pozitroni, de exemplu, pentru „Analiza cu activare neutronică" şi „Datarea cu potasiu-argon";
  - dezvoltarea de tehnologii neclare.

Tipuri de reactoare

Deşi s-au dezvoltat diferite tehnologii de realizare a reactoarele nucleare de fisiune, acestea pot fi împărțite riguros în două clase, depinzând de energia neutronilor utilizați pentru a întreține reacția de fisiune în lanț:

- Reactoarele termice (lente)

Folosesc neutroni termici. Acestea sunt caracterizate ca având materiale de moderare ce sunt destinate încetinirii neutronilor până când aceştia ajung la nivelul mediu al energiei cinetice al particulelor din mediul

înconjurător. Neutronii termici au o probabilitate mare de ciocnire cu nucleele fisionabile de ^{235}U şi, comparativ cu neutronii rapizi rezultaţi din fisiune, o probabilitate mică de captură din partea nucleelor de ^{238}U. Pe lângă moderator, reactoarele termice au combustibil încapsulat, vase sub presiune, ecrane de protecţie şi instrumentaţie de monitorare şi control pentru toate sistemele reactorului.

Multe reactoare de putere de acest tip, precum şi primele reactoare de producere a plutoniului, au fost (sunt) reactoare termice având moderator de grafit. Unele reactoare sunt mai termalizate decât altele. Centralele moderate cu grafit (de exemplu reactoarele ruseşti RBMK) şi cele moderate cu apă grea (de exemplu reactorul canadian CANDU) tind să fie mult mai termalizate decât cele de tip PWR şi BWR, acestea din urmă utilizând ca moderator apa uşoară; datorită gradului mai înalt de termalizare, reactoarele de acest tip (RBMK şi CANDU) trebuie să folosească uraniu natural (neîmbogăţit).

- Reactorii rapizi (reproducători)

Folosesc neutroni rapizi pentru a întreţine reacţia de fisiune în lanţ şi sunt caracterizaţi prin lipsa materialului de moderare. Funcţionează cu combustibil (uraniu) puternic îmbogăţit sau plutoniu, pentru a reduce procentul de ^{238}U care ar capta neutronii rapizi. Unele reactoare sunt capabile să producă mai mult combustibil decât au consumat, în mod uzual convertind ^{238}U în ^{239}Pu. Unele staţii de putere timpurii au folosit reactori rapizi, cum ar fi cele folosite la propulsia unor submarine şi vase ruseşti, altele se află încă în construcţie, dar acest tip de reactor nu a egalat succesul reactoarelor termice în nici un domeniu.

Reactoarele termice de putere pot fi împărţite şi ele în trei tipuri şi anume: cu vas de presiune, cu canale combustibile presurizate, respectiv cu răcire cu gaz.

Reactoare cu *vase de presiune* se întâlnesc în multe centrale comerciale dar şi în propulsia unor nave. În acest tip de reactor termic, vasul de presiune joacă, în acelaşi timp, şi rolul de ecran de protecţie şi, respectiv, de container pentru combustibilul nuclear.

Canalele presurizate sunt folosite în reactoarele de tip RBMK şi CANDU. Reactoarele de acest tip prezintă avantajul de a putea fi aprovizionate (încărcate) cu combustibil proaspăt chiar în timpul funcţionării.

Reactoarele răcite cu gaz folosesc (prin recirculare) un gaz inert, de obicei heliu, dar pot utiliza şi azot sau bioxid de carbon. Utilizarea căldurii variază de la reactor la reactor. Unele reactoare trimit căldura în turbine cu gaz, direct sau prin intermediul unui schimbător de căldură. Reactorul de tip PBMR, de exemplu, este răcit cu gaz.

În ce priveşte reactorii rapizi, trebuie menţionat faptul că apa serveşte ca moderator, dar ea nu poate fi folosită şi ca agent de răcire. Cei mai mulţi reactori rapizi sunt răciţi cu metal lichid, de obicei sodiu topit. Ele sunt de două tipuri: cu piscină, respectiv cu tubulatură.

Există mai mult de o duzină de proiecte de reactoare avansate, aflate în diferite stadii de dezvoltare. Unele sunt îmbunătăţiri ale proiectelor anterioare PWR, BWR şi PHWR, altele sunt radical diferite. Primele includ reactoarele avansate cu apă în fierbere (Advanced Boiling Water Reactor = ABWR) dintre care două sunt deja operaţionale şi altele în construcţie, respectiv reactoarele cu securitate pasivă ESBWR şi AP1000.

Cel mai radical şi nou proiect este reactorul modular cu strat granular (PBMR) ce face parte din categoria reactoarelor de înaltă temperatură răcite cu gaz (HTGCR). De menţionat este faptul că se află în stare de proiect noul tip de reactor, CAESAR (Clean And Environmentally Safe Advanced Reactor = reactor avansat, curat şi sigur pentru mediul înconjurător), ce foloseşte aburul pe post de moderator.

Dezvoltarea proiectelor de reactoare nucleare este un proces continuu, în acest moment discutându-se despre patru astfel de etape:

- Generaţia I

Cuprinde primele tipuri (prototipuri) de reactoare: Shippingport, Dresden, Fermi 1, Magnox etc. Se poate considera că această etapă s-a întins pe durata 1945 – 1955, deşi încă mai există în funcţiune reactoare de acest tip, amintind aici cele patru unităţi Magnox din Marea Britanie.

- Generaţia a II-a

Reprezintă reactoarele de putere comerciale: LWR, PWR, BWR, CANDU, VVER, RBMK etc. Aceste reactoare au fost dezvoltate din cele aparţinând Generaţiei I, modificările fiind destul de ample dar nu în totalitate revoluţionare. Este greu, totuşi, să se traseze o linie de demarcaţie clară dintre cele două generaţii de reactoare, mai ales pentru faptul că acestea au fost realizate pe aceleaşi principii de proiectare. S-ar putea admite că Generaţia a II-a cuprinde perioada 1955 – 1995.

- Generația a III-a

Înglobează reactoarele avansate cu apă: ABWR, System 80+, AP600, EPR etc. Acestea au fost dezvoltate din reactoarele aparținând Generației a II-a aducându-se importante perfecționări proiectelor inițiale în domeniul: tehnologiei combustibilului, al sistemelor de securitate pasivă şi nu în ultimul rând al standardizării însăşi a activității de proiectare.

Primele reactoare din Generația a III-a au fost puse în funcțiune în Japonia în anul 1996, actualele previziuni acordând Generației a III-a o durată de desfăşurare de până cel mult în 2010.

Între 2010 – 2030 se va vorbi despre Generația a III-a+, în care vor prinde viață alte proiecte avansate, revoluționare în ce priveşte scăderea cheltuielilor economice dar fără să atingă performanțele tehnice ale prototipurilor din Generația a IV-a; un exemplu de reactor aparținând Generației a III-a+ este Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR = reactor economic simplificat cu apă în fierbere).

- Generația a IV-a

Se va caracteriza prin reactoare cu înaltă eficiență economică, siguranță sporită în funcționare, deşeuri minime, etc. Găsindu-ne, deocamdată, doar la nivelul abordărilor teoretice, avem de a face cu un set de proiecte privind un nou tip de reactor nuclear ce se speră să devină comercial cel mai devreme în 2030.

Studiile în această direcție au început oficial cu ocazia dezbaterilor din *Generation IV International Forum* unde s-au stabilit cel puțin opt scopuri, începând cu creşterea securității nucleare şi terminând cu scăderea costurilor economice.

Se impune, de asemenea, dezvoltarea unui model integrat al energiei nucleare, destinat stabilirii unei metodologii standardizate şi credibilă economic de evaluare a sistemelor energetice nucleare din Generația a IV-a. În fapt se caută noi instrumente de calcul economic, de comparație între ele a înseşi diferitelor tipuri de sisteme energetice nucleare, evaluările de până acum fiind bazate doar pe o comparație a tehnologiilor nucleare cu cele bazate pe combustibili fosili.

Cele mai avansate proiecte de reactoare nucleare din Generația a IV-a sunt împărțite în şase clase (vom indica denumirea lor în engleză):

- Gas-cooled fast
- Lead-cooled fast

- Molten salt
- Supercritical water
- Very high temperature reactor
- Fission fragment reactor (reactor cu fragment de fisiune).

Familii actuale de reactoare

- Pool Type Reactor = reactor cu piscină
- Pressurized Water Reactor (PWR)
- Boiling Water Reactor (BWR)
- Fast Breeder Reactor (FBR)
- Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) sau CANDU
- United States Naval Reactor = reactor utilizat de marina Statelor Unite

Tipuri vechi aflate încă în funcțiune

- Magnox Reactor
- Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)
- Light water cooled graphite moderated reactor (RBMK)

Alte tipuri de reactoare

- Aqueous Homogeneous Reactor
- Liquid Fluoride Reactor

Ciclul combustibilului nuclear

Reactoarele termice depind, în general, de uraniul rafinat şi îmbogățit. Unele reactoare nucleare pot să opereze cu o mixtură de plutoniu şi uraniu (MOX). Succesiunea de activități prin care minereul de uraniu este extras din mină, procesat, îmbogățit, folosit în reactor, posibil reprocesat şi, în final, depozitat este cunoscută sub numele *ciclul combustibilului nuclear*.

Uraniul este scos din mină ca orice metal. Minereul brut de uraniu are o concentrație de oxid de uraniu cuprinsă între 0,05% şi 0,3%, cele mai probabile resurse largi, exploatabile la un cost de ~80$/kg fiind localizate în Australia, Kazakhastan, Canada, Africa de Sud, Brazilia, Namibia, Rusia şi Statele Unite.

Minereul brut este măcinat şi tratat chimic. Pudra rezultată, de oxid de uraniu, este transformată apoi în hexaflorură de uraniu în vederea pregătirii pentru îmbogățire.

Izotopul uşor fisionabil ^{235}U reprezintă sub 1% din uraniul natural, astfel încât cele mai multe reactoare solicită uraniu îmbogățit. Îmbogățirea presupune creşterea procentajului de ^{235}U şi se realizează, uzual, cu ajutorul difuziei gazoase sau prin centrifugare de gaz. Materialul îmbogățit rezultat este convertit în pudră de UO_2 care este apoi sinterizat sub formă de pastile ceramice. Pastilele sunt introduse în tuburi închise etanş care se numesc elemente (bare) combustibile. Într-un reactor nuclear se folosesc (se „ard") un număr mai mare sau mai mic de astfel de elemente combustibile.

Cele mai multe reactoare comerciale de tip BWR şi PWR folosesc uraniu îmbogățit până la 4%, alte reactoare de cercetare folosesc îmbogățiri mai mari, în timp ce unele reactoare comerciale cu economie ridicată de neutroni nu necesită de loc combustibil îmbogățit.

Reîncărcarea reactoarelor nucleare

Cantitatea de energie din „rezervorul" de combustibil nuclear este frecvent exprimată prin numărul de „full-power days" (zile la putere maximă), adică numărul perioadelor de 24 de ore (numărul de zile) cât este reactorul planificat să opereze la putere maximă pentru generarea energiei termice. Acest ciclu, cu alte cuvinte numărul de zile de operare la putere maximă (între două încărcări / aprovizionări ale reactorului cu combustibil proaspăt) depinde de cantitatea de ^{235}U conținut în combustibilul nuclear la începutul ciclului. Evident, cu cât procentajul de ^{235}U este mai mare la începutul ciclului, cu atât mai multe zile la putere maximă va lucra reactorul până la următoarea reîncărcare.

La sfârşitul ciclului de operare, combustibilul din unele configurații este „consumat" şi este descărcat şi înlocuit cu combustibil nou, proaspăt. Cu toate că, în practică, cea care determină durata de viață a combustibilului într-un reactor este reacția de otrăvire a combustibilul nuclear. Fracția de combustibil din centrul reactorului care se înlocuieşte cu ocazia reîncărcării este de un sfert pentru BWR şi o treime pentru PWR.

Nu toate reactoarele trebuie oprite pentru reîncărcare cu combustibil proaspăt; de exemplu, reactoarele de tip PBMR, RBMK, MSR, MAGNOX şi CANDU permit alimentarea cu combustibil proaspăt chiar în timpul funcționării. Într-un reactor CANDU se permite, de asemenea, mutarea elementelor combustibile în diferite poziții din centrul acestuia, convenabile din punctul de vedere al cantității de ^{235}U din element.

Cantitatea de energie extrasă din combustibilul nuclear se numeşte „burn up" (arsă complet) şi este exprimată în termeni de energie termică produsă pe unitatea inițială de masă de combustibil. „Burn up" se mai exprimă şi prin MW/tone de metal greu.

Surse de radiații într-un reactor CANDU

Inițial, singura sursă radioactivă ce se găseşte în reactor este uraniul din combustibilul nuclear.

În timpul funcționării reactorului, ca urmare a dezintegrărilor radioactive şi a interacțiunilor radiațiilor emise cu materialele reactorului, apar noi surse de radiații, unele menținându-se şi după oprirea acestuia. Fapt pentru care sursele de radiații din zona activă se clasifică astfel:

- *Neutroni produşi în procesul de fisiune*: în medie, la fiecare fisiune se emit 2,5 neutroni rapizi.
- *Radiații γ prompte (de fisiune)*: radiațiile γ emise în momentul fisiunii ajung să aibă o energie de până la 5 MeV/fisiune.
- *Radiații γ datorate capturii neutronice*: capturând neutroni, nucleele atomilor din materialele reactorului trec pe un nivel energetic superior, dezexcitarea producându-se prin emisie de radiații γ. Acest fenomen se petrece la nivelul combustibilului, al tecilor, al tubului de presiune, al tubului calandria, al fluidului de răcire şi al moderatorului.

Sursele menționate până acum sunt prezente numai când reactorul este în funcțiune. După oprirea reactorului vor continua să emită radiații următoarele surse:

- Produşii de fisiune

Singurul izotop fisionabil cu neutroni termici ce se găseşte în natura este uraniu ^{235}U, reprezentând un procent de 0,714% din uraniul natural. Fiecare nucleu de ^{235}U ce fisionează produce două fragmente de fisiune cu nuclee de masă intermediară. Fragmentele de fisiune, având un exces de neutroni, sunt instabile şi se dezintegrează prin emisie de radiaţii β (e^-) şi γ, ajungând, în medie, după 3 ÷ 5 dezintegrări, la un nucleu stabil.

Fragmentele de fisiune şi produşii obţinuţi prin dezintegrarea lor sunt numiţi *produşi de fisiune*.

Elementele instabile existente într-o zonă activă în funcţiune conţin o „infinitate" de astfel de produşi de fisiune. Dacă fiecare nucleu ^{235}U ar fisiona în acelaşi fel, ar rezulta doar două specii de fragmente de fisiune.

Uraniul ^{235}Upoate fisiona, însă, în mai mult de 40 de moduri diferite, rezultând, astfel, peste 80 de fragmente de fisiune.

La fisiunea ^{235}U, cele mai probabile numere atomice ale fragmentelor de fisiune sunt Z = 38 (stronţiu) şi Z = 54 (xenon).

Una din reacţiile de fisiune de mare probabilitate decurge astfel:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2\cdot ^{1}_{0}n + \gamma$$

Ambele fragmente produse sunt radioactive. Excesul de neutroni faţă de configuraţia stabilă conduce la un lanţ de dezintegrări β (e^-) genetic legate:

$$^{94}_{38}Sr \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{94}_{39}Y \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{94}_{40}Zr$$

respectiv:

$$^{140}_{54}Xe \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{140}_{55}Cs \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{140}_{56}Ba \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{140}_{57}La \xrightarrow{e^-,\gamma} ^{140}_{58}Ce$$

Au fost identificaţi peste 200 produşi de fisiune. Timpul de înjumătăţire al acestora variază de la fracţiuni de secundă la mii de ani.

În Tabelul 1 se prezintă principalii produşi de fisiune ai uraniului iradiat cu neutroni termici.

Imediat după oprirea reactorului, câmpul de radiaţii specific dezintegrării produşilor de fisiune scade foarte repede. Datorită dezintegrării produşilor de fisiune cu viaţă scurtă, după 24 ore de la oprirea reactorului, la distanţa de 1,5 m de faţa reactorului, câmpul de radiaţii γ scade la 1 ÷ 2 mGy/h.

În cazul în care teaca din zircaloy a elementului combustibil prezintă fisuri, produşii de fisiune scapă dintr-un astfel de element defect, contaminând sistemul de transport al căldurii.

Tabel 1 - PRINCIPALII PRODUŞI DE FISIUNE AI URANIULUI IRADIAT CU NEUTRONI TERMICI

A	Z	Element	$T_{1/2}$	Energie radiaţie [MeV]	
				β	γ
85	36	Kripton	10,3 ani	0,7	-
89	38	Stronţiu	53 zile	1,5	-
90	38	Stronţiu	28 ani	0,6	-
90	39	Ytriu	64 ore	2,2	-
91	39	Ytriu	60 zile	1,5	-
95	40	Zirconiu	63 zile	0,4	0,7
95	41	Niobiu	35 zile	0,16	0,75
99	42	Molibden	67 ore	1,2	0,04 ÷ 0,8
99	43	Tehneţiu	2.10^5 ani	0,3	-
103	44	Ruteniu	40 zile	0,22	0,5
106	44	Ruteniu	1 an	0,04	-
106	45	Rodiu	30 s	3,5	0,5
129	52	Telur	33 zile	-	0,11
131	53	Iod	8 zile	0,6	0,36
133	54	Xenon	5,3 zile	0,34	0,08
137	55	Cesiu	30 ani	0,5	-
137	56	Bariu	2,6 minute	-	0,66
140	56	Bariu	12,8 zile	1,0	0,16-0,5
140	57	Lantan	40 ore	0,8 ÷ 2,2	0,1 ÷ 2,5
141	58	Ceriu	33 zile	0,4 ÷ 0,6	0,14
144	58	Ceriu	284 zile	0,17 ÷ 0,3	0,03 ÷ 0,13
144	59	Praseodim	17,5 minute	3,0	0,7 ÷ 2,22
143	59	Praseodim	13,7 zile	0,9	-
147	60	Neodim	11,3 zile	0,4 ÷ 0,8	0,1 ÷ 0,5
147	61	Prometiu	2,6 ani	0,22	-

- Produşii de activare

Produşii de activare sunt atomi radioactivi ce rezultă din reacţiile (*n, γ*), (*n, p*) şi (*n, α*). Ei se formează în timpul funcţionării reactorului, când moderatorul şi agentul de răcire sunt expuşi la o iradiere puternică cu neutroni. Cei mai importanţi produşi de activare ce se formează în sistemul moderator sunt: ${}^{3}_{1}H$ (tritiu), ${}^{16}_{7}N$ (azot), ${}^{19}_{8}O$ (oxigen) şi ${}^{60}_{27}Co$ (cobalt) în

urma următoarelor reacţii:

$$^{1}_{0}n + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{1}H + \gamma$$

$$^{1}_{0}n + ^{16}_{8}O \longrightarrow ^{16}_{7}N + ^{1}_{1}p$$

$$^{1}_{0}n + ^{18}_{8}O \longrightarrow ^{19}_{7}O + \gamma$$

$$^{1}_{0}n + ^{59}_{27}Co \longrightarrow ^{60}_{27}Co + \gamma$$

Dintre aceştia, tritiul emite doar particule β, azotul şi oxigenul sunt emiţători β - γ, iar cobaltul emiţător γ.

După oprirea reactorului, formarea nucleelor radioactive prin activare încetează.

Majoritatea emiţătorilor γ din moderator, cu excepţia cobaltului, au timp de înjumătăţire ($T_{1/2}$) scurt şi dispar repede: $T_{1/2}$ pentru ^{16}N este de 7 s, iar $T_{1/2}$ pentru ^{19}O este de 27 s. Din acest motiv ^{16}N şi ^{19}O nu constituie un pericol pentru personalul de intervenţie. Însă ^{60}Co, având $T_{1/2}$ de 5,3 ani, continuă să producă câmpuri γ şi după oprirea reactorului, reprezentând un pericol de iradiere externă.

Când au loc scurgeri din sistem, există pericolul contaminării aerului cu vapori de tritiu, chiar după oprirea reactorului, deoarece are $T_{1/2}$ = 12,3 ani.

Ca şi în moderator, în sistemul de transport al căldurii, ce permite circulaţia agentului de răcire din zona activă către schimbătoarele de căldură şi înapoi, se formează: $^{3}_{1}H$, $^{16}_{7}N$ şi $^{19}_{8}O$.

O sursă suplimentară de produşi de activare cu viaţă lungă o constituie prezenţa produşilor de coroziune în agentul de răcire sau în stratul superficial al tubulaturii, ventilelor, pompelor, etc.

De exemplu, ^{60}Co este format prin activarea ^{59}Co, un element comun ce se găseşte în majoritatea oţelurilor. Având $T_{1/2}$ de 5,3 ani, ^{60}Co reprezintă un pericol deosebit deoarece se poate depune pe conducte ce rămân, astfel, radioactive mult timp după oprirea reactorului.

Din acest motiv este de dorit ca oţelurile utilizate în sistemul de transport al căldurii să aibă un conţinut cât mai scăzut posibil de cobalt.

Alţi produşi de activare importanţi sunt: ^{95}Zr ($T_{1/2}$ = 65 zile), rezultat prin activarea zircaloy-ului, ^{59}Fe ($T_{1/2}$ = 45 zile) şi ^{95}Nb ($T_{1/2}$ = 35 zile).

- Fotoneutronii

Fotonii γ cu energii mai mari de 2,21 MeV pot interacţiona cu nucleele de Deuteriu din apa grea, producând "fotoneutroni":

$$\gamma + {}^{2}_{1}\mathrm{D} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

În reactorul CANDU, această reacţie se produce oriunde apa grea este expusă la radiaţii γ de energie înaltă.

Când reactorul este oprit, producerea de fotoneutroni scade, dar nu se opreşte. Produşii de fisiune rămaşi în combustibil continuă să emită radiaţii γ suficiente pentru a produce fotoneutroni timp de $3 \div 4$ luni după oprire.

Managementul deşeurilor radioactive

Stadiul final al ciclului de combustibil nuclear este managementul combustibilului „ars", foarte înalt radioactiv, care constituie cea mai problematică componentă a fluxului de deşeuri nucleare.

După 50 de ani de energetică nucleară întrebarea „cum să se administreze aceste resturi materiale" se confruntă cu serioase probleme de securitate, tehnice şi economice, una din importantele direcţii de acţiuni a criticilor industriei nucleare fiind exact aceste costuri şi riscuri pe termen lung asociate cu managementul deşeurilor radioactive.

Administrarea combustibilului ars poate include variate combinaţii de stocare, reprocesare şi depozitare finală. În practică, combustibilul ars este stocat în piscine cu apă uşoară (apă normală), de obicei chiar în incinta centralei. Apa asigură răcirea combustibilului ars şi este ea însăşi un ecran de protecţie împotriva radioactivităţii acestuia.

După perioada de răcire şi diminuare a nivelului de radiaţii, combustibilul ars este stocat (stocare uscată) fie în containere intermediare de oţel şi beton monitorizate cu atenţie, fie în depozite finale sub formă de puţuri adânci săpate în diferite formaţiuni geologice.

Reprocesarea combustibilului ars este atractivă deoarece:

- permite reciclarea combustibilul nuclear
- asigură pregătirea deşeurilor pentru depozitarea finală.

Totuşi, experienţa Franţei, de exemplu, a arătat că depozitarea finală este mult mai economică deoarece reprocesarea combustibilului ars conduce la creşterea de 17 ori a cantităţii de deşeuri radioactive sub formă lichidă.

Reactoare nucleare naturale

Un reactor nuclear de fisiune natural poate să apară în unele circumstanţe care reproduc condiţiile dintr-un reactor construit. Singurul reactor nuclear natural cunoscut s-a format acum 2 miliarde de ani la Oklo, în Gabon – Africa.

Asemenea reactoare nu se mai pot forma pe Pământ deoarece dezintegrarea radioactivă pe această durată imensă de timp a redus proporţia de ^{235}U în uraniul natural sub limita cerută pentru a întreţine o reacţie nucleară în lanţ.

Reactoarele nucleare naturale s-au format atunci când depozitele de minerale bogate în uraniu au fost inundate de apa freatică, acţionând ca un moderator de neutroni şi determinând iniţierea reacţiei în lanţ.

Aceste reactoare naturale sunt studiate de către oamenii de ştiinţă interesaţi de depozitarea geologică a deşeurilor radioactive.

Respectivele reactoare reprezintă, în acelaşi timp, şi un caz deosebit de studiu al migraţiei izotopilor radioactivi în scoarţa Pământului, subiect abordat, de altfel, şi de criticii actualei tehnologii nucleare, mai ales în legătură cu depozitarea deşeurilor radioactive provenite din centralele de putere.

STATEGII ŞI FILIERE

Prezentăm în continuare, pe scurt, cele mai cunoscute strategii şi filiere de reactoare nucleare de fisiune.

Reactorul Magnox

Magnox este un tip învechit de reactor de putere care a fost proiectat şi folosit în Marea Britanie şi exportat în alte țari atât ca Centrală Nuclearo-Electrică cât şi în vederea producerii plutoniului pentru arme nucleare. Numele *magnox* (**Mag**nesium **n**on-**ox**idising) vine de la aliajul folosit pentru ecranarea barelor de combustibil din interiorul reactorului.

Reactoarele Magnox sunt răcite cu bioxid de carbon presurizat, moderate cu grafit şi folosesc drept combustibil uraniu natural. Proiectul acestui tip de reactor a evoluat în mod constant, foarte puține unități fiind identice. Astfel: reactoarele vechi au vase de presiune din oțel în timp ce unități mai recente au vase din beton armat; unele reactoare au geometrie cilindrică dar cele mai multe sunt sferice; presiunea de lucru variază de la 6,9 ÷ 19,35 bar în cazul vaselor de oțel până la 24,8 ÷ 27 bar în cazul celor cu vase din beton.

O caracteristică esențială din punct de vedere economic a constituit-o posibilitatea reîncărcării „din mers” cu combustibil proaspăt.

Reactoarele Magnox au un grad considerabil de securitate inerentă datorită proiectului bine gândit, a densității mici de putere și a răcirii cu gaz. Astfel, ele nu necesită un al doilea rând de ecranări. De asemenea, accidentul prin care s-ar pierde agentul de răcire nu ar cauza defectări la scară largă a combustibilului, iar ecranele de magnox sunt în stare să rețină cea mai mare parte a materialelor radioactive (s-a presupus că reactorul se opreşte rapid).

Deoarece agentul de răcire este un gaz, nu există riscul unor explozii de fierbere, de tipul catastroficei explozii cu abur din accidentul de la Cernobîl.

În proiectele mai vechi cu vas de presiune din oțel, încălzitorii şi conductele de gaz se găseau în afara ecranului biologic. Prin urmare, în acest proiect se emitea dinspre reactor o semnificativă cantitate de radiații directe, gamma şi neutronice (strălucire), doza maxim absorbită de populație ajungând până la 0,56 mSv, adică mai mult de jumătate din valoarea maximă recomandată de Comisia Internațională pentru Protecție Radiologică. La reactoarele cu vase din beton, această doză este mult mai mică.

Un proiect foarte asemănător reactorului englezesc Magnox a fost dezvoltat în Franța, reactorul UNGG, răcit cu bioxid de carbon şi moderat cu grafit, utilizând uraniu natural, materialul de ecranare fiind de această dată aliajul magneziu-zirconiu.

Gas-Cooled Reactor (GCR)

Termenul acceptat pentru toate reactoarele răcite cu gaz şi moderate cu grafit din Generația I, inclusiv Magnox şi UNGG, este acela de Gas-Cooled Reactor (GCR = reactor răcit cu gaz). Pe post de agent de răcire se foloseşte un gaz inert, cum ar fi heliu, azotul sau bioxidul de carbon.

Avantajul acestui proiect este acela că gazul de răcire poate fi încălzit la temperaturi mai mari decât apa. Ca un rezultat imediat, se poate obține o eficiență a Centralei Nuclearo-Electrice (CNE) de peste 40%, față de numai 33 ÷ 24% cât este eficiența proiectelor ce folosesc apa ca agent de răcire.

Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)

Noile reactoare răcite cu gaz, aşa-numite avansate (AGR), utilizează bioxid de uraniu slab îmbogățit (2,5 ÷ 3,5%) introdus în teci de oțel. Gazul de răcire este bioxidul de carbon, lucrând la temperaturi de 640 ^{o}C şi presiuni de 40 bar. Reactoarele AGR au bare de control ce pătrund în moderator şi un sistem secundar de oprire bazat pe injecția de azot în gazul de răcire şi, respectiv, „otrăvire” cu bor.

Proiectul de reactor AGR are la bază proiectul reactoarelor Magnox, ambele tipuri fiind moderate cu grafit şi răcite cu bioxid de carbon.

Reactoarele Magnox foloseau uraniul natural în formă metalică şi acoperit cu magneziu. Proiectul original pentru reactorul AGR prevedea utilizarea acoperirii cu beriliu.

Atunci când s-a văzut că acest tip de combustibil nuclear este inadecvat (neconvenabil) s-a trecut la îmbogățirea uraniului pentru a acoperi pierderile de neutroni în oțelul inoxidabil. Acest lucru a crescut, însă, semnificativ costurile de producție a energiei electrice.

La fel ca reactoarele de tip Magnox, CANDU şi RBMK, şi în contrast cu cele de tip LWR, reactorul AGR este proiectat să poată fi reîncărcat fără a necesita oprirea acestuia.

Se poate susține că proiectul reactorului AGR are cel puțin două avantaje majore:

- temperatură de operare înaltă, cu o înaltă eficiență termică, raportul energie electrică generată / căldură generată fiind de aproximativ 41%;
- probabilitate de accident mult mai mică decât în cazul reactoarelor răcite / moderate cu apă.

High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

Proiectul HTGR este un reactor răcit cu gaz care este încărcat cu o mixtură de grafit şi granule combustibile sferice. Acest tip de reactor a fost dezvoltat în anul 1950, interesul pentru el scăzând în timp. Recent a fost reînviată atenția pentru această tehnologie, versiunile moderne de reactor fiind cunoscute sub denumirea de Very High Temperature Reactor (VHTR = reactor cu temperatură foarte înaltă).

Very High Temperature Reactor (VHTR)

Reactorul de tip VHTR utilizează un miez operând cu uraniu într-un singur ciclul de combustibil. Acest proiect de reactor prevede temperaturi de ieşire de 1.000 ºC. Miezul poate fi sub formă de bloc prismatic sau de pat cu particule. Temperaturile înalte permit desfăşurarea unor aplicații cum ar fi procesele termice sau producerea de hidrogen prin procese termochimice. Reactorul VHTR ar trebui să fie sigur pasiv.

Gas-cooled Fast Reactor (GFR)

Sistemul GFR este în curs de dezvoltare. Clasificat ca un reactor de Generația a IV-a, el operează cu neutroni rapizi şi ciclu de combustibil închis, caracterizându-se prin eficiența conversiei uraniului fertil, respectiv managementul actinidelor.

Proiectul de referință este cel al unui reactor răcit cu heliu operând la o temperatură de 850 ºC şi folosind, pentru o înaltă eficiență termică, turbine Brayton cu ciclu de gaz. Având în vedere potențialul lor de a opera la temperaturi foarte înalte şi excelenta reținere a produşilor de fisiune reactoarele GFR pot opera cu mai multe tipuri de combustibil: ceramici compozite, sub formă de particule, compuşi ai actinidelor etc.

Proiectul de bază GFR este reactorul rapid, dar în mare măsură similar unui reactor de înaltă temperatură răcit cu gaz (High Temperature Gas-cooled Reactor = HTGR). Proiectul GFR diferă de un proiect HTGR prin aceea că miezul poate conține atât un combustibil puternic fisil cât şi unul ne-fisil, componente fertile, reproducătoare şi, bine-înțeles, pentru faptul că nu are moderator de neutroni.

Datorită conținutului de combustibil puternic fisil, şi densitatea de putere a unui GFR este mai mare decât cea a unui HGTR.

Light Water Reactor (LWR)

Reactorul de tip LWR este un reactor nuclear termic care foloseşte pe post de moderator apa normală, cunoscută şi sub numele de apă uşoară. Aceasta îl diferențiază de reactorul care foloseşte pe post de moderator apa grea. Chiar dacă şi apa uşoară conține câteva molecule de apă grea, acest lucru nu este important în cele mai multe aplicații.

Există şi alte reactoare răcite cu apă, cum ar fi cele de tip RBMK, respectiv unele reactoare producătoare de plutoniu militar. Acestea nu sunt privite ca reactoare LWR deoarece ele sunt moderate cu grafit şi, prin urmare, caracteristicile lor sunt foarte diferite.

Cele mai multe reactoare LWR sunt reactoarele cu apă sub presiune (Pressurized Water Reactor – PWR) şi reactoarele cu apă în fierbere (Boiling Water Reactor – BWR).

Reactoarele LWR folosesc combustibil cu ^{235}U îmbogățit până la aproximativ 3%. Deşi acesta este combustibilul principal, atomii de ^{238}U contribuie şi ei la procesele de fisiune prin conversia la ^{239}Pu, o jumătate

dintre aceştia fiind consumaţi în reactor. Reactoarele LWR sunt reîncărcate o dată la 12 ÷ 18 luni. Reîncărcarea presupune înlocuirea a aproximativ 25% din combustibilul ars.

Reactoarele LWR sunt mai simple şi mai ieftine decât reactoarele cu apă grea şi chiar dacă au aceleaşi capabilităţi privind generarea de energie, este mult mai dificil să fie folosite pentru producerea plutoniului pentru arme nucleare; pentru aceasta ele ar trebui să fie realimentate o dată la fiecare patru luni pentru înlocuirea combustibilul nuclear deoarece, în caz contrar, acumularea izotopului ^{240}Pu devine o adevărată otravă pentru ^{239}Pu. Un dezavantaj al reactoarelor LWR este acela că trebuie să utilizeze uraniu îmbogăţit în timp ce reactoarele cu apă grea pot folosi direct uraniul natural.

Pressurized Water Reactor (PWR)

Reactoarele PWR sunt reactoare nucleare care utilizează, atât pe post de moderator cât ca şi agent de răcire, apa aflată la înaltă presiune. Numele PWR provine de la faptul că circuitul primar de răcire este păstrat la înaltă presiune pentru a preveni fierberea apei.

Acesta este unul dintre cele mai comune tipuri de reactoare şi este folosit în întreaga lume. Mai mult de 230 de astfel de reactoare se află deja în funcţiune pentru a genera energie electrică şi alte câteva sute pentru propulsia navală. De fapt, reactoarele PWR au fost proiectate de Best Atomic Power Laboratory iniţial tocmai pentru a fi folosite la propulsia submarinelor.

Reactoare PWR mici funcţionează şi în regiunile polare, căldura generată de acestea fiind folosită pentru încălzirea clădirilor.

Într-un reactor PWR combustibilul nuclear încălzeşte, prin conducţie, apa din circuitul primar de răcire. Apa fierbinte este pompată într-un fel de schimbător de căldură numit generator de abur, care permite încălzirea unui circuit secundar de răcire. Transferul de căldură este realizat fără amestecarea celor două fluide deoarece fluidul din circuitul primar de răcire este radioactiv, ceea ce nu se doreşte şi pentru fluidul din circuitul secundar.

Aburul format în generator alimentează o turbină cu abur şi energia extrasă de turbină este folosită pentru a pune în mişcare un generator electric. După trecerea prin turbină, fluidul din circuitul secundar este răcit în continuare într-un condensator după care reintră în generatorul de abur. Acest lucru reduce presiunea la ieşirea din turbină conducând la creşterea eficienţei termice.

Două lucruri sunt caracteristice reactoarelor PWR în comparaţie cu alte tipuri de reactoare:

- într-un reactor PWR există două circuite de răcire independente (primar şi secundar) care sunt, ambele, umplute cu apă normală (uşoară); un reactor cu apă în fierbere (BWR), de exemplu, are un singur circuit de răcire, iar alte reactoare, cum ar fi cele reproducătoare, utilizează alte substanţe pentru răcire;

- presiunea în circuitul primar de răcire este de aproape 16 MPa, mult mai mare decât în orice alt reactor nuclear, fapt pentru care, conform legii gazelor, apa din acest circuit nu va ajunge niciodată să fiarbă; prin contrast, într-un reactor BWR agentul de răcire este încălzit până la fierbere, aburul obţinut fiind, în unele proiecte, trimis direct peste turbină, fără a mai utiliza un al doilea circuit de răcire.

Reactoarele PWR, fiind reactoare termice, cer, pentru întreţinerea reacţiei în lanţ, ca neutronii rapizi să fie încetiniţi, proces numit moderare. Atâta timp cât masa unei molecule de apă este foarte similară dimensiunii unui neutron, fiecare neutron rapid suferă numeroase ciocniri cu moleculele de apă, încetinindu-se. Această moderare a neutronilor va fi cu atât mai puternică cu cât apa este mai densă.

Într-un reactor PWR, apa de răcire este folosită şi ca moderator, acest lucru constituind o caracteristică a funcţionării sigure. Astfel, orice creştere de temperatură duce la scăderea densităţii apei, deci la o scădere şi a gradului de termalizare a neutronilor rapizi, rezultatul final fiind scăderea însăşi a reactivităţii reactorului.

Prin urmare, dacă are loc o creştere a activităţii reactorului peste limita normală, moderarea redusă a neutronilor va conduce la reducerea numărului de reacţii în lanţ, producându-se, astfel, o scădere a căldurii şi revenirea reactorului în limite normale de funcţionare.

Reactorul PWR este foarte stabil. În contrast, la reactorul de tip RBMK folosit la Cernobîl (care foloseşte, ca moderator, grafit şi nu apă), creşterea temperaturii fluidului de răcire conduce la creşterea cantităţii de căldură generată, reactorul RBMK devenind, astfel, instabil.

Uraniul folosit în reactoarele PWR este îmbogăţit în ^{235}U până la câteva procente. Ca o măsură de siguranţă, proiectul PWR nu conţine suficient uraniu fisil pentru a întreţine o reacţie în lanţ prompt-critică,

deoarece o asemenea reacție în lanț ar degaja suficientă energie pentru a distruge sau chiar topi miezul reactorului.

Reactoarele de putere PWR, comerciale şi militare, sunt controlate în mod normal variind concentrația de acid boric din circuitul primar de răcire. Borul absoarbe puternic neutroni şi creşterea sau descreşterea concentrației sale în reactor afectează în mod corespunzător activitatea neutronilor.

Pentru aceasta se impune utilizarea unui sistem de control compus din pompe de înaltă presiune necesare îndepărtării apei din circuitul primar de răcire şi reinjectării de apă cu diferite concentrații de acid boric. Barele de control, introduse de sus în jos în zona combustibilului, sunt folosite în mod normal numai în operațiile de pornire şi oprire a reactorului.

Dimpotrivă, reactoarele BWR nu au bor în circuitul de răcire şi controlul puterii se realizează prin ajustarea debitului de curgere a fluidului de răcire (apă). Acest lucru reprezintă un avantaj al reactoarelor BWR deoarece, pe de o parte, acidul boric este foarte coroziv şi, pe de altă parte, nu mai este necesar sistemul de încărcare şi descărcate asociat. Totuşi cele mai multe reactoare BWR comerciale de putere au un sistem de oprire de urgență care foloseşte o soluție concentrată de acid boric injectabilă în circuitul primar de răcire.

Şi reactoarele CANDU folosesc bor pentru oprirea reacției nucleare în lanț.

- Avantaje:

  - Reactorul PWR este foarte stabil datorită tendinței sale de a produce mai puțină putere odată cu creşterea temperaturii, reducându-se prin aceasta probabilitatea de a se pierde controlul reacției de fisiune nucleară în lanț.
  - Reactorul PWR poate fi operat cu un miez conținând mai puțin material fisil decât cantitatea cerută pentru funcționarea în stare prompt-critică; acest lucru reduce semnificativ probabilitatea ca reactorul să devină necontrolat, el fiind, şi din acest punct de vedere, foarte sigur.
  - Deoarece folosesc uraniu îmbogățit, reactoarele PWR au ca moderator apa uşoară, fapt ce presupune costuri mult mai mici decât în cazul reactoarelor cu moderator apă grea.

- Dezavantaje:

  - Apa de răcire trebuie să se găsească la presiuni foarte ridicate pentru a rămâne lichidă la temperaturi înalte; aceasta presupune formularea unor cerințe stricte de fabricație pentru vasul de presiune şi tubulatură şi creşterea adecvată a costurilor de construcție.

  - Cele mai multe reactoare PWR nu pot fi reîncărcate în timpul funcționării; aceasta limitează eficiența lor şi presupune existența unor perioade semnificative de timp de nefuncționare.

  - Apa foarte fierbinte, conținând acid boric dizolvat, este corozivă, atacă tubulatura de oțel şi conduce la vehicularea prin circuitul primar de răcire a produşilor de coroziune radioactivi; aceasta nu numai că limitează durata de viață a reactorului, dar utilizarea unui sistem special de filtrare a produşilor de coroziune radioactivi creşte costurile de operare.

  - Deoarece apa uşoară absoarbe neutroni, se impune îmbogățirea uraniului, fapt ce conduce la creşterea prețului combustibilului folosit; evident, s-ar putea utiliza apă grea pentru a opera reactorul cu uraniu natural, dar în acest caz cresc cheltuielile cu fabricația apei grele şi acestea trebuie să se reflecte automat în prețul energiei electrice.
  - Având în vedere faptul că apa acționează ca un moderator de neutroni, nu este posibil să se construiască reactoare cu neutroni rapizi folosind proiectul PWR. Deci nu este posibil să se construiască nici reactoare rapide reproducătoare răcite cu apă. Este posibil, în schimb, să se construiască reactoare reproducătoare termice folosind răcirea cu apă grea.

  - Scăderea bruscă a temperaturii fluidului de răcire poate duce la creşterea ratei de producere a energiei până la valori ce ar putea afecta însăşi combustibilul nuclear.

Boiling Water Reactor (BWR)

Reactorul cu apă în fierbere (BWR) este un reactor din generația a II-a, dezvoltat de General Electric la mijlocul anilor 50.

În contrast cu reactoarele cu apă sub presiune (PWR), într-un reactor BWR aburul necesar turbinei ce generează electricitate este produs în miezul reactorului mai degrabă şi nu într-un generator sau schimbător de căldură.

Într-un reactor BWR există un singur circuit în care apa, aflată la o presiune mai joasă (75 bar) fierbe în miezul reactorului la aproximativ 285^{o}C. Reactorul este proiectat să opereze cu 12 ÷ 15% din apă din partea superioară a miezului sub formă de abur, rezultând o moderare slabă, eficiență neutronică scăzută şi densitate de putere scăzută comparativ cu baza miezului. Prin comparație, într-un reactor PWR nu există fierbere deoarece circuitul primar este menținut sub presiune înaltă (158 bar).

- Avantaje:

  - vasul reactorului şi componentele asociate lucrează la o presiune substanțial scăzută (75 bar) comparativ cu un reactor PER (158 bar);
  - vasul de presiune este supus unei iradieri substanțial scăzute comparativ cu un reactor PWR, şi deci nu există pericolul de a deveni casant cu trecerea timpului;
  - operează la o temperatură joasă a combustibilului nuclear.

- Dezavantaje:

  - calcule complexe operaționale de management al utilizării combustibilului nuclear în elementele combustibile pe durata producției de putere, din cauza curgerii bifazice a apei (apă şi abur) în partea superioară a miezului; se impune mai multă instrumentație în miezul reactorului;
  - vasul de presiune este mult mai larg decât la un reactor PWR de aceeaşi putere, cu costuri corespunzătoare; (totuşi costurile totale pot să scadă deoarece reactorul BWR nu are generator de abur, schimbător de căldură şi tubulatura asociată);

- contaminarea turbinei cu produşi de fisiune (mai puțin în cazul tehnologiilor cu combustibil modern);
- se impune ecranarea şi controlul accesului în jurul turbinei de abur în timpul operării normale din cauza nivelului de radiații provenite din intrarea aburului direct din miezul reactorului; se cer şi măsuri de precauție suplimentare în ceea ce priveşte activitatea de mentenanță a turbinei;
- barele de control trebuie inserate mai jos şi, deci, pot să nu cadă în reactor sub întreaga lor greutate în cazul unei pierderi totale de putere (în cele mai multe tipuri de reactoare, barele de control sunt suspendate cu electromagneți, permițând căderea lor în caz de pierdere a puterii).

Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)

Generația curentă de reactoare de tip BWR ce operează în Japonia poartă numele de Advanced Boiling Water Reactor (ABWR = reactor avansat cu apă în fierbere).

Heavy Water Reactor (HWR)

Reactoarele HWR folosesc apa grea pe post de moderator. Apa grea este oxidul de deuteriu D_2O. Deuteriul este un izotop al hidrogenului. Cei mai mulți atomi de hidrogen au un nucleu constituit dintr-un singur proton, dar deuteriul are un proton şi un neutron, făcându-l de aproape două ori mai greu decât atomul de hidrogen. De aici vine şi denumirea de *apă grea*, adică apă în care doi atomi (mai grei) de deuteriu sunt legați de un atom de oxigen.

Neutronii dintr-un reactor nuclear care foloseşte uraniu trebuie încetiniți (moderați) pentru a putea scinda alți atomi. Ca moderator se poate folosi apa uşoară, ca în cazul reactoarelor LWR, dar, deoarece aceasta absoarbe neutroni, uraniul trebuie îmbogățit. Ca moderator, apa grea nu absoarbe neutroni (cel puțin nu în proporția întâlnită la apa uşoară) astfel încât reactoarele HWR pot folosi drept combustibil nuclear uraniul natural (neîmbogățit).

Presurised Heavy Water Reactor (PHWR)

Într-un reactor PHWR, apa grea este folosită atât ca moderator cât şi ca agent de răcire. În cel de al doilea rol, apa grea este ţinută sub presiune pentru a i se permite o încălzire cât mai înaltă fără să se ajungă la fierbere. Deoarece apa grea este scumpă, pentru echilibrarea cheltuielilor economice, reactoarele PHWR pot lucra cu uraniu natural (neîmbogăţit).

Reactoarele comerciale PHWR originale sunt canadiene, de tip CANDU, până acum fiind puse în funcţiune aproape 30 de unităţi. În India se operează cu 11 unităţi PHWR, primele reactoare provenind din proiectul CANDU, iar ultimele fiind semnificativ diferite de acesta.

Actualele proiecte de reactoare PHWR vor fi înlocuite, în viitor, cu versiuni îmbunătăţite cum ar fi cel indian – Advanced Heavy Water Reactor (AHWR = reactor avansat cu apă grea), sau cel canadian – Advanced CANDU Reactor (ACR = reactor CANDU avansat).

În proiectul CANDU de bază, apa grea este conţinută într-un tanc (rezervor) de mari dimensiuni, numit *vas calandria*. Acesta este penetrat de 380 de canale combustibile orizontale (un canal combustibil este format din doi cilindri concentrici: *tubul calandria* în interiorul căruia se găseşte *tubul de presiune*) prin care este vehiculată, sub presiune, tot apă grea, de data aceasta ca agent de răcire.

Ca şi în cazul reactorului PWR cu apă uşoară, circuitul primar de răcire cedează căldură unui al doilea circuit (secundar) în care apa uşoară este adusă în stare de abur. Tubul de presiune conţine fasciculele combustibile, poate fi deschis individual şi încărcat cu combustibil proaspăt chiar în timpul funcţionării reactorului.

De remarcat este faptul că reactorul CANDU are cel mai scurt timp de oprire cunoscut până acum.

Un alt aspect particular (şi eficient) al reactorului PHWR este temperatura relativ scăzută a moderatorului (apă grea), fapt pentru care neutronii sunt *mai termalizaţi* decât în cazul moderatoarelor cu temperatură normală de lucru mai ridicată. Prin urmare, nu numai că reactorul CANDU „arde" uraniu natural, dar îl „arde" într-un mod mult mai eficient.

Advanced CANDU Reactor (ACR)

Reactorul CANDU avansat este un proiect al AECL şi reprezintă următorul nivel de evoluţie a reactoarelor CANDU existente. Este un reactor răcit cu apă uşoară care încorporează atât tehnologii PHWR cât şi tehnologii

APWR. Foloseşte un proiect similar celui specific reactorului cu apă grea şi generator de abur (Steam Generating Heavy Water Reactor – SGHWR).

Proiectul utilizează combustibil SEU (Slightly Enriched Uranium), apă uşoară drept agent de răcire şi apă grea ca moderator. Sistemul de reglare a reactivităţii şi dispozitivele de siguranţă sunt localizate în interiorul moderatorului aflat la joasă presiune.

Reactorul ACR înglobează, de asemenea, şi caracteristici specifice proiectului CANDU, incluzând: posibilitatea de alimentare cu combustibil proaspăt în timpul funcţionării (sistem combustibil CANFLEX); neutroni prompţi cu viaţă lungă; retenţie de reactivitate mică; două sisteme independente de oprire rapidă în siguranţă; sistem de răcire de urgenţă a miezului reactorului. Miezul compact are dimensiuni reduse la jumătate faţă cel clasic, pentru aceeaşi putere de ieşire: 700 MWe pentru ACR-700 şi, în viitor, 1.200 MWe pentru ACR-1000.

Reactorul RBMK

RBMK este acronimul de la denumirea rusească *Reaktor Bolshoi Moschnosti Kanalnye* (Реактор Большой Мощности Канальный) care înseamnă „reactor de înaltă putere cu canale de presiune” şi descrie o clasă mai veche de reactoare nucleare moderate cu grafit şi răcite cu apă. Reactorul RBMK a fost gândit să asigure plutoniu necesar activităţilor militare.

Folosind apă uşoară pentru răcire şi grafit pentru moderare, reactorul RBMK poate să folosească drept combustibil nuclear chiar uraniul natural. Se pot construi şi reactoare RBMK de mare putere care nu cer uraniu îmbogăţit sau apă grea, dar astfel de configuraţii sunt instabile.

Reactor RBMK utilizează tuburi de presiune verticale de 7 m lungime care trec printr-un moderator de grafit şi care sunt răcite cu apă uşoară ce poate fierbe la 290 ^{o}C. Combustibilul nuclear este oxid de uraniu slab-îmbogăţit introdus în miezul reactorului sub formă de fascicule de 3,5 m lungime.

În prezenţa unei moderări puternice din partea grafitului fix, orice exces de fierbere (apariţia aburului) reduce gradul de răcire şi absorbţia de neutroni, dar fără a deranja reacţia de fisiune, astfel că reactorul poate pune probleme (coeficient de vid pozitiv) de genul celor întâmplate pe 26 aprilie 1986, în Ucraina, la Centrala Nuclearo-Electrică de la Cernobîl.

În tuburile de presiune sunt introduse fascicule combustibile de 3,5 m lungime. Reactorul RBMK posedă maşini de încărcare / descărcare a

acestor fascicule, astfel încât realimentarea miezului cu combustibil proaspăt se poate face chiar în timpul operării. Reactorul RBMK a fost gândit să folosească şi uraniu reciclat, obținut prin reprocesarea combustibilului nuclear de tip PWR.

Reactorul VVER

Proiectul rusesc VVER (sau WWER) cuprinde o serie de reactoare cu apă sub presiune. Reactorul VVER este o alternativă la reactorul RBMK, cu precizarea că noul model trebuie oprit pentru alimentarea cu combustibil proaspăt.

Primele reactoare VVER au fost dezvoltate înainte de 1970. Cel mai comun proiect este VVER-440 Model V230, ce utilizează şase circuite primare de răcire, fiecare având câte un generator orizontal de abur. Seria reactoarelor VVER a fost îmbunătățită continuu, mai ales în sensul scăderii dimensiunilor astfel încât să poată fi utilizate şi pe submarinele militare nucleare sau nave de suprafață (spărgătoare de gheață).

Abrevierea rusească VVER desemnează reactorul energetic răcit şi moderat cu apă. Aceasta înseamnă că reactorul VVER este de tipul PWR, adică foloseşte apă sub presiune. Combustibilul este bioxid de uraniu slab-îmbogățit (2,4 ÷ 4,4 % ^{235}U), sinterizat în pastile şi asamblat în elemente combustibile. Aceste elemente combustibile sunt imersate complet în apa menținută la o presiune de aproximativ 15 MPa astfel încât aceasta să nu înceapă să fiarbă. Această apă serveşte atât ca agent de răcire cât şi moderator, fapt ce garantează siguranță intrinsecă în circumstanțe normale: dacă scade debitul de răcire atunci se diminuează şi efectul de moderare, astfel încât se reduce şi intensitatea reacției în lanț (coeficient de vid negativ).

Întregul reactor este închis într-o structură masivă de oțel rezistentă la presiune.

Intensitatea reacției nucleare este controlată cu bare de control care pot fi inserate în reactor pe la partea sa superioară. Acestea sunt realizate dintr-un material absorbant de neutroni, efectul lor depinzând de adâncimea la care au fost inserate în miez. În caz de urgență, un sistem special acționează în vederea inserării totale a barelor de control.

Aşa cum s-a prezentat mai sus, apa din *circuitul primar de răcire* este menținută la o presiune constantă pentru a împiedica fierberea. Deoarece apa care transportă căldura din miez este şi radioactivă, o atenție deosebită din punct de vedere al siguranței în funcționare trebuie acordată cel puțin următoarelor patru sisteme cruciale ce intră în componența circuitului primar de răcire:

- *Reactorul*: apa curge peste fasciculele de bare combustibile, preluând căldura degajată în reacția nucleară în lanț;
- *Presurizorul*: pentru a păstra apa la presiune constantă, presurizorul realizează reglajele necesare cu ajutorul unor încălzitoare electrice şi a unor valve de siguranță;
- *Generatorul de abur*: în generatorul de abur (orizontal), căldura din circuitul primar de răcire este folosită pentru a fierbe apa din circuitul secundar;
- *Pompa*: pompa asigură buna circulație a apei rin circuit.

Pentru a fi sigure, toate cele patru componente de mai sus sunt redundante.

Referindu-ne acum la *circuitul secundar de răcire* şi producția de curent electric, atenția se distribuie către:

- *Generatorul de abur*: apa din circuitul secundar de răcire preia căldura de la circuitul primar şi se încălzeşte până la fierbere, aburul obținut fiind apoi uscat;
- *Turbina*: aburul uscat se destinde peste palele turbinei, punând-o în mişcare de rotație, odată cu ea rotindu-se şi generatorul electric. Turbina este împărțită în două părți: de înaltă şi, respectiv, de joasă presiune. Pentru a preveni condensarea (picăturile de apă ce ar lovi cu viteză mare palele turbinei pot provoca serioase deteriorări ale acestora) aburul este reîncălzit la trecerea între cele două secțiuni. Reactorul VVER-1000 produce 1 GW energie electrică;
- *Condensatorul*: după ieşire din turbină, aburul este forțat să condenseze şi să cedeze, astfel, din nou, căldură;
- *Degazorul*: înlătură gazele din agentul de răcire;
- *Pompa*: pompele de circulație sunt puse în mişcare prin mici turbine proprii cu abur.

Pentru creşterea eficienței procesului, aburul din turbină este folosit pentru reîncălzirea fluidului de răcire înainte de degazor şi generatorul de abur. Apa din circuitul secundar de răcire (se presupune că) nu este

radioactivă. În fapt avem un circuit deschis, apa fiind preluată în mod uzual dintr-un rezervor exterior cum ar fi, de exemplu, un lac sau un râu (fluviu).

Pentru a nu încălzi acest rezervor prea mult şi a nu polua în acest fel mediul înconjurător, bazinele de răcire (sau coloanele de răcire) permit apei să se răcească înainte de a reintra în rezervor.

Proiectul reactorului VVER asigură importante bariere de siguranţă în vederea prevenirii scăpării de material radioactiv. Se pot enumera cel puţin patru astfel de facilităţi:

- *Pastilele de combustibil*: elementele radioactive sunt reţinute în interiorul structurii cristaline a pastilelor combustibile;
- *Barele (elementele) combustibile*: tuburile de zircaloy constituie a doua barieră, fiind rezistentă la căldură şi înaltă presiune;
- *Vasul reactorului*: constă dintr-o manta de oţel ce înconjoară ermetic ansamblul combustibil;
- *Clădirea reactorului*: clădirea din beton armat care înglobează întregul circuit primar este gândită să reziste la presiune.

Spre deosebire de alte proiecte de reactoare de putere, proiectul VVER nu include o clădire suficient de rezistentă pentru a apăra reactorul de eventuale incidente externe, cum ar fi, de exemplu, căderea unui avion.

SuperCritical Water Reactor (SCWR)

Reactorul SCWR este un concept aparţinând Generaţiei a IV-a, care foloseşte ca fluid de lucru apa supercritică (încălzind apă aflată la presiuni extrem de mari, aceasta nu ajunge să fiarbă şi să se transforme în abur). Un reactor SCWR este la bază un reactor LWR dar care operează la presiuni şi temperaturi ridicate, în ciclul direct cu o sigură fază. Deşi se asemănă cu un reactor BWR cu ciclu direct, deoarece fluidul său de lucru este apa supercritică, reactorul SCWR operează cu o singură fază, deci asemănător reactorului PWR. Cu sublinierea că reactorul SCWR operează la presiuni şi temperaturi mult mai mari decât cele specifice PWR şi BWR.

Reactoarele SCWR sunt sisteme avansate deoarece promit eficienţe termice de ordinul 45% (faţă de 33% pentru un reactor LWR) şi simplificarea constructivă a Centralelor Nuclearo-Electrice. Misiunea principală a unui reactor SCWR este obţinerea de electricitate la costuri scăzute, fiind deja în atenţia cercetătorilor din 13 ţări.

Reactorul SCWR foloseşte ca moderator apa uşoară. Moderarea este realizată iniţial datorită densităţii mari a apei subcritice. Combustibilul utilizat este cel tradiţional dintr-un LWR, dar ecranat ca într-un BWR pentru

a reduce posibilitatea realizării de puncte calde ce ar putea cauza variații ale proprietăților miezului. Agentul de răcire este apa supercritică.

Operarea deasupra presiunii critice elimină posibilitatea de fierbere a apei, astfel încât agentul de răcire rămâne într-o singură fază peste tot în sistem. Menținerea apei într-o singură fază, cea lichidă, permite convertirea unei mai mari cantități de căldură în energie electrică. În plus, într-o centrală cu reactor SCWR se pot elimina toate echipamentele destinate managementului aburului: pompele de recirculație, presurizoare, generatoare de abur, separatoare şi uscătoare de abur, reducându-se prin aceasta şi prețurile de cost. Controlul unui reactor SCWR se face cu bare de control inserate pe verticală, de sus în jos, ca la PWR.

Avantaje: eficiență termică înaltă şi, evident, simplificarea ca atare a Centralelor Nuclearo-Electrice.

Dezavantaje: nu se cunosc încă suficient de bine fenomenele chimice implicate, la care se adaugă constrângeri de material.

Liquid metal cooled reactor

Reactoarele răcite cu metale lichide (Liquid metal cooled reactor) sunt de tipul „avansat" şi folosesc ca agent de răcire metale topite.

Inițial, reactoarele cu metale lichide au fost folosite pentru submarinele nucleare, cum ar fi clasa de submarine ruseşti Alfa, răcite cu plumb.

La fel, Centralele Nuclearo-Electrice ruseşti BN-600 şi BN-350 sunt răcite cu topitură de sodiu.

Agent de răcire sub formă de metal lichid este folosit de asemenea în reactoarele cu neutroni rapizi, incluzând aici şi reactorii rapizi reproducători. Multe reactoare din Generația a IV-a sunt răcite cu metale lichide şi anume: sodiu, plumb sau săruri topite.

Fast Breeder Reactor (FBR)

Cele mai multe reactoare rapide reproducătoare (FBR) utilizate în Centrale Nuclearo-Electrice sunt răcite cu sodiu lichid. Există două proiecte de bază:

- reactoare FBR cu buclă, în care agentul primar de răcire este circulat printr-un schimbător de căldură extern vasului

reactorului, dar în interiorul unui sistem de ecranare biologică datorită prezenței izotopului radioactiv ^{24}Na;

- reactoare FBR cu piscină, în care agentul de răcire şi schimbătoarele primare de căldură se găsesc în interiorul vasului reactorului.

Există prototipuri de reactoare FBR răcite şi cu alte metale lichide cum ar fi: mercur, plumb şi NaK, iar o propunere de reactor aparținând Generației a IV-a se referă chiar la reactoare FBR răcite cu heliu.

Reactoarele FBR folosesc în mod uzual o mixtură formată din 20% PuO_2 şi 80% UO_2. Plutoniul utilizat poate proveni din reprocesarea combustibililor arşi (surse civile sau militare). În jurul miezului reactorului se găsește un înveliş de tuburi conținând ^{238}U nefisil care, prin captură de neutroni proveniți din reacțiile de fisiune, se transformă în ^{239}Pu fisil (la fel ca uraniul din miez) şi care poate fi reprocesat în vederea utilizării drept combustibil nuclear.

Deoarece reacțiile de fisiune sunt generate cu neutroni rapizi, nu este nevoie de moderator.

Reactoarele FBR mai vechi au folosit combustibil metalic: uraniu îmbogățit şi plutoniu.

Reactoarele FBR folosesc metalul lichid ca agent primar de răcire, pentru a prelua căldură din miezul reactorului şi a încălzi, prin intermediul schimbătoarelor de căldură, apă uşoară până la stadiul de aburi necesari turbinelor. Agentul de răcire uzual este sodiul, dar s-au folosit cu succes şi plumb şi NaK în cazul unor instalații mai mici. Alte reactoare mai vechi au folosit chiar mercur. Un avantaj al mercurului şi al NaK este aceea că ambele sunt lichide la temperatura camerei, situație ce convine instalațiilor experimentale, dar de mai mică importanță în cazul Centralelor Nucleare-Electrice mari.

Sodiul lichid din miezul reactorului conține izotopul radioactiv ^{24}Na. Acesta are o durată de viață scurtă, dar prezența lui impune păstrarea întregii bucle primare de răcire în interiorul unui ecran de protecție biologică.

Apa uşoară nu poate fi folosită ca agent primar de răcire deoarece este un absorbant de neutroni, fapt ce afectează reproducerea; totuşi, cel puțin teoretic, există posibilitatea construirii de reactori termici reproducători moderați cu apă grea şi folosind drept combustibil toriu pentru a produce izotopul fisil ^{233}U.

Un proiect special de reactor cu neutroni rapizi a fost *reactorul rapid integral* (Integral Fast Reactor – IFR) cunoscut şi sub denumirea de *reactor rapid reproducător integral* (Integral Fast Breeder Reactor – IFBR).

Pentru a rezolva problema distrugerii şi depozitării deşeurilor radioactive, reactoarele IFR au avut o unitate proprie de reprocesare care recicla uraniu şi toate elementele transuranice (altele decât plutoniu) prin galvanoplastie, îndepărtând în primul rând produşii de fisiune cu timpi de înjumătățire scurți. Unii din aceşti produşi de fisiune puteau fi, apoi, separați pentru uz industrial sau medical. Proiectul IFR a fost stopat în anul 1994.

Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR)

Reactorul LMFBR operează cu ciclul de combustibil uraniu-plutoniu sau cu ciclul de combustibil toriu-uraniu (^{233}U). Reactorul este încărcat cu o specie de izotopi ai plutoniului, iar zona de reproducere este uraniu natural sau uraniu sărăcit.

Teoretic, numărul de neutroni de fisiune per un neutron absorbit de ^{239}Pu creşte monoton odată cu creşterea peste 100 keV a energiei neutronului absorbit. Aceasta înseamnă că rata de reproducere şi profitul reproducerii cresc odată cu energia medie a neutronilor ce induc fisiuni în sistem. Evident, se impune evitarea oricăror cauze ce ar putea duce la încetinirea neutronilor din reactor.

Prin urmare, acest tip de reactor nu posedă moderator, ci numai combustibil şi agent de răcire.

Ca agent de răcire în reactoarele LMFBR moderne se foloseşte sodiu topit. Având masa atomică 23, sodiul nu încetineşte în mod apreciabil neutronii în urma ciocnirilor elastice. Atâta timp cât sodiul topit este un material cu o comportare excelentă în transferul de căldură, un reactor LMFBR poate să funcționeze la o densitate de putere înaltă.

Prin urmare, miezul reactorului poate fi de dimensiuni reduse. Mai mult, deoarece sodiul are punctul de fierbere foarte ridicat, circuitul de răcire poate fi utilizat la temperaturi înalte şi la presiune atmosferică fără ca sodiul să ajungă la fierbere şi, deci, nu se impune folosirea unor vase de presiune greoaie. Temperatura înaltă a fluidului de răcire conduce la obținerea de aburi de înaltă temperatură şi presiune, deci o eficiență termică ridicată a centralei. În fine, sodiul topit, spre deosebire de apă, nu este coroziv, componentele reactorului imersate în sodiu lichid păstrându-şi calitățile ani de zile la rând.

Totuşi sodiul are şi proprietăți nedorite. Punctul său de topire este mult mai înalt decât temperatura camerei astfel încât întregul sistem de

răcire trebuie menținut încălzit tot timpul pentru a preveni solidificarea sodiului din interior. Acest lucru se realizează înfăşurând o spirală formată din rezistență electrică încălzită peste conducte, valve ş.a.m.d.

Sodiul are de asemenea o înaltă reactivitate chimică. Sodiul cald reacționează violent cu apa şi se aprinde în contact cu aerul, emițând nori denşi de fum alb de peroxid de sodiu. Fapt pentru care reactoarele LMFBR sunt sisteme foarte etanşe şi emit în mediu mai puține radiații decât reactoarele LWR comparabile.

Din păcate, sodiul absoarbe neutroni, chiar şi neutroni rapizi, conducând la formarea emițătorului beta-gamma ^{24}Na, cu timp de înjumătățire de 15 ore. Prin urmare, sodiul care trece prin miezul reactorului devine radioactiv. Centralele operează cu ciclu de abur, adică căldura de la reactor este utilizată pentru producerea aburului în generatoare de abur.

Totuşi, din cauza radioactivității sodiului şi a faptului că sodiul reacționează violent cu apa, transportul sodiului încălzit direct de la reactor către generatorul de abur nu este o problemă practică chiar aşa de uşor de rezolvat. La nivelul generatorilor de abur există pericolul unor pierderi de sodiu şi de apă ce conduc la degajări de radioactivitate în mediu.

Toate reactoarele LMFBR au două circuite cu sodiu topit; un circuit primar prin care este circulat sodiul radioactiv şi un al doilea circuit de sodiu, neradioactiv, care transportă căldura de la primul circuit, printr-un schimbător de căldură, către generatorul de abur.

Maniera detaliată în care este realizat al doilea circuit împarte acest tip de reactoare în două grupe: cu tubulatură şi, respectiv, cu piscină.

Tipul de reactoare LMFBR cu tubulatură este cel mai simplu, fiind asemănător cu proiectul unui reactor PWR. Toate componentele circuitului primar, miezul reactorului, pompele, schimbătoarele de căldură ş.a.m.d. sunt separate şi independente. Acest lucru uşurează activitățile de inspecție, mentenanță şi reparații. Totuşi se impune montarea în jurul întregului circuit primar a unor ecrane de protecție de dimensiuni considerabile, transformând centrala într-o adevărată fortăreață.

Prin contrast, un reactor LMFBR cu piscină nu are pierderi de radioactivitate din vasul reactorului şi, deci, nici o componentă a centralei nu trebuie ecranată. În plus, practica uzuală este de a localiza vasul reactorului parțial în pământ, astfel încât numai porțiunea vasului de deasupra solului necesită ecranare. Se poate circula prin camera reactorului când reactorul este în funcțiune şi se poate circula chiar şi peste partea superioară a vasului reactorului fără a primi doze semnificative de radiații. Prin urmare, reactorul LMFBR cu piscină este foarte etanş şi compact.

Miezul unui reactor LMFBR constă dintr-un sistem de recipiente de formă hexagonală având 10 ÷ 15 cm dimensiune transversală şi 3 ÷ 4 m lungime în care se găsesc atât material combustibil cât şi material fertil. Dispunerea acestora în miezul reactorului conduce la o structură cu simetrie cilindrică înconjurată din toate părţile cu material fertil.

Combustibilul utilizat este un amestec de oxizi de plutoniu şi uraniu, îmbogăţirea echivalentă ajungând între 15% şi 35%. Materialul fertil conţine numai bioxid de uraniu. Ambele tipuri de materiale sunt asamblate mult mai etanş decât în reactoarele de tip LWR şi HWR.

Sodiun cooled Fast Reactor (SFR)

Reactorul SFR este un proiect construit pe două proiecte apropiate existente deja, LMFBR şi IFR. Sistemul SFR oferă condiţii de management eficient al actinidelor şi de conversie a uraniului fertil.

Ciclul de combustibil funcţionează pe reciclarea totală a actinidelor, existând două opţiuni majore:

- Un reactor răcit cu sodiu de putere intermediară (150 ÷ 600 MWe) cu combustibil metalic: uraniu + plutoniu + actinide + zirconiu, cu reprocesare prin metode pirometalurgice „la faţa locului”.
- Un reactor răcit cu sodiu de putere „medie spre mare” (500 ÷ 1.500 MWe) cu combustibil sub formă de mixtură de oxizi ai uraniului şi plutoniului, reprocesabil prin metode apoase într-o locaţie centrală ce ar servi mai multe reactoare de acelaşi tip.

Reactorul SFR este recunoscut pentru managementul adecvat al deşeurilor înalt-radioactive, în particular cel al plutoniului şi al diferitelor actinide. Printre facilităţile importante de securitate a sistemului se includ: un timp de răspuns termic relativ lung, o limită largă a fierberii agentului de răcire, sistem de răcire care lucrează la presiune atmosferică şi existenţa unui al doilea circuit de sodiu ce transferă căldura de la circuitul primar de sodiu (radioactiv) către circuitul de apă uşoară şi abur al Centralei Nuclearo-Electrice.

Cu unele inovaţii destinate reducerii costurilor, reactorul SFR poate să servească ca sursă de energie electrică de dimensiuni reduse. Cu atât mai mult cu cât acest tip de reactor face posibilă utilizarea materialelor fisile şi fertile (inclusiv uraniu sărăcit) considerabil mult mai eficient decât reactoarele termice.

Lead cooled Fast Reactor (LFR)

Reactorul LFR aparţine Generaţiei a IV-a operând cu neutroni rapizi, agent de răcire sub formă de plumb topit sau eutectic plumb-bismut, într-un circuit închis de combustibil. Opţiunile includ un domeniu mai larg de evaluări pentru o Centrală Nuclearo-Electrică, unităţi de 50 ÷ 150 MWe putând fi organizate modular pentru a obţine centrale de la 300 ÷ 400 MW până la 1.200 MW. Combustibilul nuclear este uraniu metalic sau nitride. Răcirea se face prin convecţie naturală, temperatura de ieşire fiind, în mod normal, de 550 ºC , dar putând ajunge şi până la 800 ºC cu materiale avansate. Aceste valori înalte de temperatură sunt suficiente pentru producerea de hidrogen prin metode termochimice şi chiar a apei potabile.

„Bateria" de reactoare LFR fiind o construcţie de dimensiuni reduse şi operând cu combustibil ce necesită a fi împrospătat doar o dată la 15 ÷ 20 de ani, a fost aplicată cu succes în primul rând în scopuri militare, amintind aici reactoarele OK-550 şi BM-40A de 155 MW specifice clasei Alfa de submarine ruseşti. Reactoarele LFR sunt mult mai uşoare decât cele răcite cu apă şi au avantajul de a putea fi rapid „comutate" între modurile de operare la putere minimă, respectiv putere maximă. Există însă şi pericolul solidificării topiturii de plumb-bismut ce ar face reactorul inoperabil.

Molten Salt Reactor

Reactoarele din tipul MSR funcţionează cu combustibil lichid şi pot fi folosite pentru producerea de electricitate, arderea actinidelor, producţia de hidrogen şi material fisil. Izotopii fisili, fertili şi de fisiune sunt dizolvaţi într-o topitură foarte fierbinte de sare fluoridică, al cărei punct de topire este de 1400 C, adică exact temperatura combustibilului din reactor şi a fluidului de răcire.

Combustibilul lichid curge prin miezul reactorului, acesta din urmă conţinând grafit cu rol de moderator. În miez, la o presiune apropriată de cea atmosferică, fisiunile au loc în combustibilul curgător încălzit până la 700ºC şi circulat printr-un schimbător primar de căldură, căldura fiind transferată către un circuit secundar conţinând de asemenea săruri topite. Evident, combustibilul lichid se întoarce în miezul reactorului, în timp ce sărurile topite din circuitul secundar transportă căldura către un ciclu Brayton de înaltă temperatură ce transformă căldura în electricitate. Ciclul Brayton (cu sau fără ciclu de abur) poate să folosească ca fluid de lucru azot sau heliu.

Folosirea combustibilului lichid, față de combustibilul solid din alte concepte din Generația a IV-a creează capabilități potențiale unice care nu sunt obținute în reactoarele cu combustibil solid, dar implică şi un set diferit de provocări tehnice. Capabilitățile unice anunțate mai sus includ:

- distrugerea radionuclizilor cu viață lungă fără a fi necesar să se fabrice combustibil solid;
- posibilități largi de alegere a ciclurilor de combustibil fără a aduce modificări în construcția reactorului;
- cantitatea mică de combustibil fisil (chiar şi a zecea parte față de un reactor rapid, per 1 kW electric) permite dezvoltarea unor strategii alternative de funcționare sigură;
- siguranță pasivă totală în reactoare foarte mari, asociate cu economii la scală; În condiții de accident, combustibilul este drenat către tancuri de răcire pasivă şi stocare sigură;
- limitarea radioactivității în miezul reactorului prin îndepărtarea şi solidificarea în timp real a produşilor de fisiune;
- cerințe limitate de exces de reactivitate în miezul reactorului datorită posibilității de management al combustibilului chiar în timpul funcționării.

Tipurile de reactoare nucleare se pot clasifica după puterea obținută şi temperatura fluidului de răcire. Reactoarele LWR sunt de temperatură joasă şi presiune înaltă. Reactorii rapizi tradiționali, răciți cu sodiu lichid, operează la temperaturi medii şi presiuni joase. Există două opțiuni pentru fluidele de răcire de înaltă temperatură: (1) gaze de înaltă presiune şi (2) lichide la joasă presiune cu puncte de fierbere deasupra temperaturii de lucru.

Reactoarele MSR sunt de înaltă temperatură, proiectate inițial (1960) pentru a asigura aer de înaltă-temperatură motoarelor cu reacție proprii avioanelor. Noul concept, abordat în „the Next Generation Nuclear Plant NGNP" (centrale nucleare din generația următoare) este reactorul modular, cu temperatură foarte înaltă VHTR) utilizând ca agent de răcire heliu. Deoarece NGNP este un reactor cu temperatură înaltă, dezvoltarea sa oferă multiple soluții tehnologice pentru un reactor avansat cu săruri topite (Advanced Molten Salt Reactor – AMSR) cum ar fi:

- ciclurile de putere Brayton (pentru a înlocui mai vechile MSR cu ciclu de abur);
- schimbători de căldură compacți (pentru a înlocui schimbătorii de căldură cu tubulatură şi manta);

- materiale carbon-carbon compozite (pentru a înlocui unele componente metalice).

Noile tehnologii dezvoltate pentru AMSR/NGNP implică potențiale reduceri majore a costurilor şi reduce sau elimină aproape jumătate din provocările tehnice specifice unui reactor MSR.

Următorul exemplu încearcă să ilustreze câteva implicații ale tehnologiei NGNP pentru reactorul de tip MSR. Reactorul MSR tradițional are un ciclu de putere cu abur. Temperatura de lucru a ciclului cu abur este de ~550 ^{o}C, dar cerințele pentru proprietăți fizice (bune) ale sărurilor topite implică operarea la cel puțin 700 ^{o}C. Limitele de temperatură din ciclul de abur împiedică obținerea unei conversii eficiente a căldurii în electricitate. Temperatura apei reci cere proiectarea unor facilități speciale pentru a evita solidificarea topiturii de săruri. Adoptarea unui ciclu Brayton de înaltă temperatură pentru un reactor MSR conduce, pe de o parte, la creşterea eficienței (cu majore implicații de ordin economic) şi, pe de altă parte, elimină o serie de dificultăți tehnice.

Molten Salt Breeder Reactor (MSBR)

Conceptul proiectului de referință pentru un reactor MSBR (reactor reproducător cu săruri topite) presupune utilizarea unui sistem de două fluide, cu săruri de combustibil fisil separate de sărurile cu materialul fertil, vehiculate prin tuburi de grafit. Sărurile combustibile conțin fluorură dizolvată într-o mixtură de fluorură de litiu-beriliu, în timp ce sărurile reproducătoare conțin fluorură de toriu-litiu în compoziție eutectică (27 moli % fluorură de toriu). Energia generată în fluidul reactorului este transferată unui ciclu cu abur supercritic.

Advanced Liquid Metal Reactor (sau Integral Fast Reactor)

Un reactor avansat răcit cu metal lichid (Advanced Liquid Metal Reactor = ALMR), cunoscut şi sub denumirea de reactor rapid integral (Integral Fast Reactor = IFR) este un proiect de reactor nuclear rapid folosind un ciclu special de combustibil. S-a construit chiar un asemenea prototip, dar proiectul a fost oprit înainte să fie copiat.

Acest tip de reactor este răcit cu sodiu lichid şi foloseşte drept combustibil un aliaj metalic de uraniu şi plutoniu. Combustibilul nuclear

este menţinut în recipiente de oţel, spaţiul dintre combustibil şi peretele recipientului fiind umplut cu sodiu lichid.

Reactorul IFR a fost proiectat astfel încât dacă acesta s-ar supraîncălzi, atunci combustibilul s-ar dilata şi reacţia în lanţ s-ar opri automat datorită scăderii densităţii materialului fisil, această caracteristică fiind cunoscută sub numele de securitate pasivă.

Totuşi trebuie notat că reactorul nu este complet sigur. De exemplu, folosirea sodiului lichid ca agent de răcire nu este o problemă atât de simplă deoarece sodiu reacţionează chimic, este extrem de volatil şi poate să explodeze în contact cu apa. În urma unui astfel de accident sever la sistemul agentului de răcire ar fi improbabilă menţinerea reactorului şi a mediul înconjurător într-o „stare sigură”.

Obiectivele proiectului IFR au fost creşterea eficienţei de utilizare a uraniului prin producerea de plutoniu şi eliminarea nevoii de a scăpa de izotopi transuranici. Reactorul a fost proiectat fără moderator, deci operând cu neutroni rapizi şi permiţând consumarea tuturor izotopilor transuranici, aceştia fiind folosiţi, în unele cazuri, chiar pe post de combustibil.

Comparativ cu reactoarele curente LWR al căror ciclu de combustibil utilizează mai puţin de 1% din energia din uraniu, reactorul IFR are ciclu de combustibil foarte eficient (utilizare în proporţie de 99,5%). Acest proiect de bază a folosit separarea electrolitică pentru îndepărtarea transuranicelor şi actinidelor din deşeurile nucleare şi concentrarea lor, la faţa locului, în elemente combustibile noi.

Deoarece în acest tip de combustibil nu s-a separat plutoniu, nu au existat posibilităţi directe de utilizare pentru arme nucleare. Pe de altă parte, deoarece plutoniul nu a părăsit niciodată reactorul, acest lucru a contribuit la reducerea riscului unor diversiuni neautorizate.

Un alt beneficiu important al îndepărtării elementelor transuranice cu timpi de înjumătăţire mari din deşeurile nucleare este că acestea din urmă devin mai puţin periculoase, după depozitarea finală ele urmând să devină neradioactive în cel mult 300 de ani.

- Avantaje:

  - Siguranţă ridicată datorită înaltei conductivităţi termice a combustibilului.
  - Capabilitatea de a suporta pierderi de agent de răcire sau pierderi de căldură fără risc de accident nuclear.
  - Uşurinţa de fabricaţie a combustibilului. Deoarece sodiul umple spaţiul liber dintre pereţii recipientului şi

combustibilul nuclear, acesta din urmă nu necesită precizie de fabricație. Combustibilul este pur şi simplu turnat.
- Deoarece turnarea este simplă, combustibilul poate fi fabricat şi manevrat de la distanță, reducându-se pericolul iradierii radioactive;
- Reprocesarea este simplificată deoarece nu este necesară reducerea radioactivității combustibilului; Actinidele pot fi, astfel, incorporate în combustibil.
- Riscurile de proliferare sunt reduse datorită înaltei radioactivități a combustibilului. Deoarece combustibilul conține cantități semnificative de elemente transuranice cu rate înalte de fisionare spontană, nu este posibil să se fabrice arme nucleare folosind combustibil din reactorul IFR. Acest lucru ar presupune folosirea unei extrem de dificile separări centrifugale.
- În urma reprocesării electro-pirolitice a combustibilului din reactorul IFR se obțin deşeuri în formă metalică sau ceramică, ambele fiind adecvate depozitării finale în straturi geologice.
- Deşeurile finale nu conțin plutoniu sau actinide. Radioactivitatea acestor deşeuri poate dispărea complet în minimum 300 de ani.

- Dezavantaje:

  - Inflamabilitatea sodiului. Sodiul arde uşor în aer şi se aprinde spontan în contact cu apa.
  - Sub bombardament cu neutroni, se produce ^{24}Na, izotop foarte radioactiv, emițător de radiații gamma energetice (2,7 MeV). Totuși, timpul de înjumătățire a ^{24}Na este de numai 15 ore, astfel încât acest izotop nu reprezintă un pericol pe termen lung.

Pebble Bed Reactor (PBR) & Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)

Reactorul cu strat granular (Pebble Bed Reactor – PBR), numit şi reactor modular cu strat granular (Pebble Bed Modular Reactor – PBMR) este un proiect de reactor nuclear avansat.

Această tehnologie presupune (cere) nivele de securitate şi eficienţă extrem de ridicate.

Ca moderator de neutroni se foloseşte grafit pirolitic, iar ca agent de răcire se utilizează un gaz inert sau semi-inert cum ar fi heliu, azot sau bioxid de carbon, la temperaturi foarte înalte, cu acţionare directă asupra turbinei. Se elimină astfel managementul complex al aburului şi se creşte eficienţa termică de până la 50%. Deoarece gazele nu dizolvă contaminanţi şi nu absorb neutroni proveniţi din miezul reactorului (cum se întâmplă în cazul apei), reactorul PBR este mult mai economic decât un reactor LWR.

O centrală cu reactor PBR combină două rezultate avansate din ingineria nucleară: răcirea cu gaz verificată cu bune rezultate în trecut şi o metodă nouă de ambalare a combustibilului nuclear ce reduce complexitatea acestuia în limite bine conturate de siguranţă. Combustibilul nuclear format din uraniu, toriu sau plutoniu este utilizat în formă ceramică (uzual oxizi sau carburi), conţinut în granule sferice fabricate din grafit pirolitic care acţionează ca un moderator primar de neutroni. Fiecare sferă este, efectiv, un „mini-reactor" conţinând toate părţile componente ale unu reactor convenţional. Atingerea criticităţii se obţine prin punerea la un loc a cantităţii necesare de astfel de sfere.

Primul avantaj a reactorului PBR este acela că poate fi proiectat să opereze în condiţii de autocontrol. Dacă reactorul se încălzeşte prea mult, atunci spectrul energetic al neutronilor liberi va fi modificat prin efect Doppler. În mod normal neutronii eliberaţi în fisiunea ^{235}U sunt de energie prea înaltă pentru a mai putea reacţiona cu alt atom de ^{235}U, dar prea mică pentru a reacţiona cu atomii de ^{238}U. În felul acesta se diminuează rata reacţiilor în ^{235}U şi scade temperatura combustibilului. Se stabileşte astfel o limită naturală a puterii (energiei) produsă de reactor. Vasul reactorului este astfel proiectat încât, în lipsa unor intervenţii externe, să piardă mai multă căldură decât poate genera în stare de nefuncţionare. Acest proiect se adaptează foarte bine cerinţelor de securitate. În particular, combustibilul este închis în granule, iar spargerea unei granule va pune în libertate sfere de material radioactiv de 0,5 mm în diametru.

Granulele sunt stocate în canistre, prin spaţiul dintre granule şi pereţii canistrei fiind circulat un gaz inert (heliu, azot sau bioxid de carbon) în vederea extragerii căldurii din reactor. În mod ideal, gazul încălzit ar putea fi circulat direct printr-o turbină. Totuşi, deoarece gazul din circuitul primar de răcire poate ajunge radioactiv în urma ciocnirii cu neutronii din reactor, el poate fi circulat printr-un schimbător de căldură care, la rândul său, încălzeşte un al doilea gaz sau produce direct abur ce trece prin turbină. Gazul (aburul) care iese din turbină este încă destul de fierbinte şi poate fi

folosit la încălzirea clădirilor, în centrale chimice, sau pentru punerea în mişcare a altor maşini termice.

Cea mai mare parte a costurilor unei Centrale Nuclearo-Electrice cu reactor convenţional răcit cu apă este înglobată în complexitatea sistemului de răcire. Acesta din urmă face parte din întregul proiect se securitate şi cere sisteme de siguranţă extensive şi redundante. Dimensiunile unui reactor răcit cu apă sunt limitate de sistemele de răcire ataşate lui. În plus, miezul reactorului iradiază apa cu neutroni, astfel încât apa şi impurităţile dizolvate în ea devin radioactive. Mai mult, tubulatura circuitului de înaltă presiune din miez devine „fragilă", cerând a fi inspectată continuu şi, eventual, înlocuită.

Din contra, un reactor PBR este răcit cu gaz, în unele cazuri la presiune scăzută. Spaţiul dintre granule formează „tubulatura" din miezul reactorului. Neavând de a face cu tuburi în miez şi deoarece agentul de răcire nu conţine hidrogen, nu există probleme de fragilizare. Gazul preferat, heliu, nu absoarbe neutroni sau impurităţi şi astfel este, pe de o parte, mai eficient şi, pe de altă parte, mai slab radioactiv decât apa.

Un alt avantaj al unui reactor PBR faţă de unul convenţional LWR este acela că primul operează la temperaturi mult mai înalte. Reactorul poate încălzi în mod direct fluidul destinat turbinelor de gaz de joasă presiune. Temperaturile înalte permit turbinei să extragă mai multă energie mecanică din aceeaşi cantitate de energie termică; prin urmare sistemele de putere cu reactoare PBR folosesc mai puţin combustibil per kilowatt-oră.

Un avantaj tehnic semnificativ este acela că unele proiecte sunt reglate prin temperatură şi nu prin bare de control. Reactorul poate fi simplificat, deoarece el nu trebuie să opereze în prezenţa unor profile de neutroni stabilite prin introducerea parţială a barelor de control Numai pentru desfăşurarea activităţilor de mentenanţă, unele proiecte includ şi bare de control, numite absorbanţi, care sunt inserate prin tuburi în reflectorul de neutroni ce înconjoară miezului reactorului. Fiind controlat prin temperatură, reactorul PBR îşi poate modifica rapid puterea numai prin modificarea debitului agentului de răcire. Alte modalităţi de modificare rapidă a puterii se bazează pe modificare densităţii sau a capacităţii calorice a agentului de răcire.

Un alt avantaj este acela că granule conţinând combustibili diferiţi pot fi folosite (dar nu în acelaşi timp) într-un proiect de reactor unic. Adepţii reactoarelor PBR susţin faptul că unul şi acelaşi tip poate să opereze atât cu plutoniu, toriu şi uraniu natural (neîmbogăţit), cât şi cu uraniu îmbogăţit. Există în atenţia proiectanţilor şi tipuri de reactoare PBR care să folosească

combustibil MOX, adică mixturi de uraniu şi plutoniu provenind din surplus de material radioactiv sau din arme nucleare expirate.

În cele mai multe proiecte de reactoare PBR staționare, reîmprospătarea combustibilului se face în mod continuu. În locul opririi reactorului pentru reîncărcare, granulele sunt introduse în recipiente şi reciclate (circulate), de jos în sus, de aproximativ zece ori pe o durată de câțiva ani, fiind testate şi măsurate la fiecare astfel de ciclu. Când şi-au epuizat materialul fertil, granulele sunt îndepărtate în spațiul cu deşeuri radioactive, iar în reactor sunt introduse granule proaspete.

Conceptul „modular" de reactor PBR foloseşte mai multe reactoare mici într-o Centrală Nuclearo-Electrică mare. Acest lucru este convenabil deoarece noile investiții pot fi graduale şi corelate cu cerința de energie electrică. În locurile unde se cere multă energie se vor instala, pur şi simplu, mai multe reactoare PBR. Proiectul de reactor PBR modular permite producerea „de masă" a reactoarelor mici, reducând costurile privind certificările de securitate şi calificare a proiectului. În sisteme modulare, echipamentul de răcire a gazului ieşit din turbine trebuie să fie adaptat la situația din teren. Cel mai adecvat astfel de echipament este turnul de răcire. Totuşi, dacă centrala se află lângă o sursă adecvată de apă, răcirea cu apă va fi mai ieftină.

Reactorul PBR este cu autocontrol termic, fără intervenție din partea unui operator extern. Este răcit cu gaz inert, ignifug, gazul nu suferă tranziție de fază şi, prin urmare, scade enorm riscul apariției unei explozii (la reactoarele LWR există riscul unei explozii cu abur). Moderatorul este carbon solid. Acesta nu acționează ca agent de răcire, nu se află în mişcare şi nu are tranziție de fază (ca la reactorul cu apă grea). Prin urmare, chiar dacă un reactor PBR ar avea componente defecte, el nu se va fisura, nu se va topi, nu va exploda şi nu va împrăştia deşeuri periculoase. Pur şi simplu va atinge o temperatură de nefucționare, vasul reactorului va radia căldură, dar vasul şi granulele vor rămâne intacte. Reactorul va putea fi reparat sau combustibilul înlăturat.

Reactorul PBR este operat în mod intenționat sub temperatura de coacere a grafitului, astfel încât să nu se acumuleze energie Wigner. Prin aceasta se elimină stocarea de energie în grafit prin dislocare cristalină (dislocațiile produse de trecerea neutronilor prin grafit) şi se elimină riscul apariției accidentelor de tipul celui de la centrala Windscale. Reîmprospătarea continuă a combustibilului elimină riscul apariției unui exces de reactivitate în miezul reactorului PBR şi oferă posibilitatea inspectării permanente a elementelor combustibile. Cele mai multe reactoare

PBR conţin mai multe nivele de armătură a containerelor pentru a preveni contactul dintre materialele radioactive şi biosferă:

- Cele mai multe sisteme sunt incluse în clădirea reactorului, proiectată să reziste la cutremure de pământ sau prăbuşirea unui avion.
- Reactorul însuşi se găseşte într-o cameră cu pereţi de 2 m grosime şi cu uşi care pot fi închise etanş, cu sisteme de răcire ce pot fi umplute de la orice fel de sursă de apă.
- Vasul reactorului este, uzual, închis etanş.
- Proiectul combustibilului nuclear (numit şi combustibil TRISO) este, de asemenea, crucial pentru simplificarea şi securitatea reactorului PBR.

Cea mai comună critică adusă la adresa reactorului PBR este aceea că încastrarea combustibilului în grafit potenţial inflamabil (vezi accidentul de la Windscale) reprezintă un risc serios. În timpul arderii grafitului, particule de material nuclear pot fi transportate în afară prin fum. Deoarece arderea grafitului cere prezenţa oxigenului, granulele sunt învelite cu un strat impermeabil de carbid siliconic, iar vasul reactorului este golit de oxigen. Deşi carbidul siliconic este rezistent la abraziune şi compresie, nu are aceeaşi rezistenţă sub acţiunea forţelor de forfecare.

Unii produşi de fisiune cum ar fi xenon-133 sunt absorbit în cantităţi limitate în carbon şi astfel în unele granule se poate acumula suficient gaz pentru a sparge învelişul de carbid siliconic. Chiar dacă o granulă fisurată nu se va aprinde şi nu va arde în vasul reactorului (din lipsă de oxigen), ea nu va putea fi rotită şi inspectată luni de zile la rând, devenind vulnerabilă. Unele proiecte de reactoare PBR nu prevăd containere (clădiri) speciale, acestea devenind în mod potenţial mult mai vulnerabile la atacuri externe şi permiţând materialelor radioactive să se împrăştie în caz de explozie.

Deoarece combustibilul este conţinut în granule de grafit, volumul deşeurilor radioactive este mai mare, dar el prezintă aceeaşi radioactivitate măsurată în becquereli per kilowatt-oră ca şi deşeurile nucleare de la celelalte tipuri de reactoare. Trebuie remarcat faptul că deşeurile tind să devină mai puţin periculoase şi mai simplu de manipulat. Defectele apărute în timpul fabricării granulelor combustibile pot cauza alte probleme complexe.

Deşeurile radioactive trebuie să fie depozitate în siguranţă pentru mai multe generaţii umane, reprocesate, transmutate în alte tipuri de reactoare sau distruse prin metode ce urmează abia să fie descoperite. Din acest punct de vedere, granulele de grafit sunt mult mai dificil de reprocesat

datorită structurii lor. Susținătorii reactoarelor PBR găsesc în aceasta un plus al combustibilului TRISO, în sensul că este dificil să se reutilizeze deşeuri provenite de la PBR în arme nucleare.

Ultimul argument al criticilor proiectului PBR este chiar accidentul din 1986 din Germania, când operatorii reactorului au încercat să disloce o granulă strivită şi blocată în sistemul de alimentare. Acest accident a eliberat radiații în mediul înconjurător şi a fost principala cauză care a condus la oprirea programului de cercetare de către guvernul german etc.

DEŞEURI RADIOACTIVE

Deşeurile radioactive conțin elemente chimice radioactive care nu mai au utilizare practică. Deşeul radioactiv este uneori produsul unui proces nuclear, cum ar fi fisiunea nucleară. Cele mai multe deşeuri radioactive sunt „de nivel scăzut", ceea ce înseamnă că ele au nivele scăzute ale radioactivității, raportate fie la masă fie la volum. Acest tip de deşeu constă adesea din elemente cum ar fi echipamentul (hainele) de protecție, care sunt doar slab contaminate, dar periculoase în caz de contaminare radioactivă a corpului uman prin ingerare, inhalare, absorbție sau injecție.

Surse de deşeuri radioactive

- Materiale radioactive existente natural

Procesarea substanțelor conținând radioactivitate naturală conduce la producerea de deşeuri radioactive cunoscute şi sub denumirea NORM (Naturally Occurring Radioactive Material). Cele mai multe dintre aceste deşeuri sunt emițătoare de particule alfa, prin reacțiile de fisiune în lanț ale uraniului şi toriului.

- Cărbune

Cărbunele conține o cantitate mică de nuclizi radioactivi, cum ar fi uraniu şi toriu, dar la o concentrație mult mai mică decât cea a respectivelor radio-elemente aflate în crusta terestră. Aceste deşeuri radioactive devin mai concentrate în cenuşă deoarece ele „nu ard bine" (nu oxidează). Totuşi radioactivitatea cenuşii rămâne foarte mică. Ea este de aceeaşi valoare ca a şisturilor negre şi mai mică decât a rocilor fosfatice, dar prezintă interes deoarece cenuşa ajunsă în atmosferă poate fi inhalată.

- Petrol şi gaze naturale

Reziduurile industriale de petrol şi gaze naturale conţin uneori radiu şi compuşi ai acestuia. Familia sulfaţilor din petrol poate fi foarte bogată în radiu, şi, în general, apa, petrolul şi gazele naturale pot conţine radon. Radonul se dezintegrează pentru a forma radioizotopi solizi care intră în compoziţia depunerilor din interiorul conductelor. Într-un combinat de procesare a petrolului (combinat petrochimic) zona unde este procesat propanul este cea mai contaminată deoarece radonul are acelaşi punct de fierbere ca şi propanul.

- Procesarea mineralelor

În general, aproape toate deşeurile rezultate din prelucrarea mineralelor pot conţine radioactivitate naturală.

- Surse medicale

Deşeurile radioactive medicale tind să conţină emiţători de raze beta şi gamma. În diagnosticarea medicală prin metode radioactive se folosesc emiţători gamma cu viaţă scurtă cum ar fi ^{99m}Tc. Alţi radioizotopi folosiţi în medicină sunt: ^{90}Y ($t_{1/2}$ = 2,7 zile) folosit în tratarea limfei; ^{131}I ($t_{1/2}$ = 8,0 zile) folosit pentru teste funcţionale ale tiroidei şi tratarea cancerului; tiroidei; ^{89}Sr ($t_{1/2}$ = 52 zile) folosit pentru tratarea cancerului osos şi injecţii intravenoase; ^{192}Ir ($t_{1/2}$ = 74 zile) folosit pentru braho-terapie; ^{60}Co ($t_{1/2}$ = 5,3 ani) folosit pentru braho-terapie şi radioterapie externă; ^{137}Cs ($t_{1/2}$ = 30 ani) folosit de asemenea pentru braho-terapie şi radioterapie externă.

- Surse industriale

Sursele industriale de deşeuri radioactive pot conţine emiţători alfa, beta, neutroni şi gamma. Emiţătorii gamma sunt folosiţi în radiografii în timp de sursele emiţătoare de neutroni sunt folosite într-o serie de aplicaţii cum ar fi exploatarea sondelor petroliere.

- Ciclul combustibilului nuclear

Deşeurile provenite din prima fază a ciclului combustibilului nuclear sunt, în mod uzual, emițători alfa întâlniți în procesul de extracție a minereului de uraniu. Cel mai adesea este vorba despre radiu şi produşii rezultați în urma dezintegrării radiului.

Concentratul de bioxid de uraniu (UO_2) scos din mină nu este foarte radioactiv: doar de o sută de ori mai radioactiv decât granitul folosit în construcția clădirilor. Însă UO_2 este rafinat în „turtă galbenă" (U_3O_8), apoi convertit în hexaflorură de uraniu gazoasă (UF_6). Sub formă de gaz, uraniul suferă o îmbogățire în conținutul de izotop ^{235}U de la 0,7% până la 3,5% (combustibil LEU = Low Enriched Uranium). Urmează apoi reconvertirea în bioxidul de uraniu (solid ceramic) pentru a fi introdus în fasciculele combustibile.

Principalul subprodus al îmbogățirii este uraniul sărăcit, în principal izotopul ^{238}U, cu o concentrație de ^{235}U de aproximativ 0,3%. El este stocat atât sub formă de UF_6 cât şi U_3O_8. Uneori este folosit în aplicații unde densitatea lui foarte mare este prețioasă, cum ar fi chila iahturilor şi proiectilele anti-tanc. Este de asemenea utilizat (împreună cu plutoniu reciclat) pentru obținerea combustibilului MOX şi pentru diluarea uraniului înalt îmbogățit din armele nucleare dezafectate, acesta fiind redirecționat drept combustibil în reactoare nucleare. Această diluare este şi o măsură de prevedere în sensul că orice națiune care ar folosi combustibil ars pentru fabricarea de arme nucleare va trebui să repete procesul (foarte scump şi complex) de îmbogățire.

La sfârşitul ciclului de combustibil nuclear, fasciculele combustibile „arse" conțin produşi de fisiune care emit radiații gamma, actinide care emit particule alfa cum ar fi ^{234}U, ^{237}Np, ^{238}Pu şi ^{241}Am, sau emițători de neutroni cum ar fi Cf. Aceşti izotopi s-au format în reactor.

Este important să se facă distincție între procesarea uraniului pentru fabricația de combustibil şi reprocesarea combustibilului uzat. Combustibilul uzat conține produşi de fisiune înalt-radioactivi. Unii dintre ei sunt absorbanți de neutroni. Cantitatea acestora poate creşte până la nivelul când absorbția de neutroni devine atât de importantă încât reacția de fisiune în lanț se opreşte, chiar şi atunci când barele de control ar fi scoase complet. În acest moment combustibilul din reactor (conținând şi o cantitate substanțială de ^{235}U şi plutoniu) trebuie înlocuit cu combustibil proaspăt. Combustibilul ars poate fi stocat sau poate fi reprocesat pentru îndepărtarea produşilor de fisiune. Reprocesarea presupune mânuirea de materiale înalt-radioactive (atât produşii de fisiune îndepărtați din combustibilul ars cât şi substanțele chimice folosite în acest proces sunt înalt-radioactive).

Proliferarea (răspândirea) deşeurilor radioactive

O preocupare importantă legată de tranzacţionarea uraniului şi plutoniului se referă la posibilitatea utilizării acestor materiale pentru fabricarea de arme nucleare. În general, reactoarele nucleare active şi depozitele de arme nucleare sunt foarte atent păzite şi controlate. Totuşi deşeurile înalt-radioactive provenite de la reactoarele nucleare conţin plutoniu. Este adevărat, acest plutoniu (de calitate redusă) conţine un amestec de ^{239}Pu (foarte adecvat fabricării de arme nucleare) şi ^{240}Pu (un contaminant nedorit şi înalt-radioactiv), iar cei doi izotopi sunt dificil de separat. Mai mult, deşeurile sunt pline de produşi de fisiune înalt-radioactivi (unii cu timpi de înjumătăţire relativ scurţi). Preocuparea este că dacă aceste deşeuri sunt depozitate (în structuri geologice), atunci după un număr de ani produşii de fisiune se dezintegrează, scade radioactivitatea deşeurilor şi accesul la plutoniu devine mai uşor. Cu atât mai mult cu cât izotopul indizerabil ^{240}Pu se dezintegrează mai repede decât ^{239}Pu şi calitatea materialului necesar armelor nucleare creşte în timp (deşi cantitatea sa scade în timp). Prin urmare aceste depozite de deşeuri vor deveni cu timpul adevărate „mine de plutoniu”.

Criticii „minei de plutoniu” susţin că timpul de înjumătăţire al ^{240}Pu este de 6.560 ani iar pentru ^{239}Pu avem $t_{1/2}$ = 21.110 ani şi, prin urmare, această relativă îmbogăţire „naturală” ar necesita 9.000 ani pentru a obţine plutoniu de calitatea (concentraţia) cerută de armele nucleare. Cu alte cuvinte, aceste „mine de plutoniu” ar fi o problemă a viitorului îndepărtat, omenirea având la dispoziţie timp suficient (9.000 ani) pentru a găsi soluţii tehnologice înainte ca ea să devină acută.

O soluţie este reciclarea plutoniului şi utilizarea lui drept combustibil în reactorii rapizi. În acest caz înseşi centralele în care se reprocesează plutoniul devin surse (şi preocupări) ale proliferării nucleare. Pe de altă parte, trebuie reamintit totuşi faptul că în reactorii rapizi piro-metalurgici se generează ca deşeuri radioactive doar compuşi ai actinidelor, ce nu pot fi folosiţi la fabricarea armelor nucleare.

Reprocesarea armelor nucleare

Deşeurile provenite din reprocesarea armelor nucleare (în opoziție cu producția acestora, care cere procesarea primară a combustibilului scos din reactor) este puțin probabil să conțină activitate beta sau gamma mai mare decât tritiu sau americiu. Este mai probabil să conțină actinide emițătoare alfa, cum ar fi ^{239}Pu (folosit la fabricarea armelor nucleare), sau ^{238}Pu sau poloniu.

În trecut, declanşatorul de neutroni din bombe era beriliu şi un emițător alfa înalt-activ cum ar fi poloniul, o alternativă la poloniu fiind şi izotopul ^{238}Pu. Din motive de securitate națională, detalii privind proiectele actualelor bombe, moderne, nu se găsesc, evident, în literatura de specialitate.

Este probabil ca materialul fisil din bombele vechi reutilate să conțină produşi de dezintegrare ai izotopului de plutoniu utilizat, adică este probabil să includă emițători alfa precum ^{236}Np (provenit de la impuritățile cu ^{240}Pu) plus ^{235}U provenit din dezintegrarea izotopului ^{239}Pu. Totuşi, datorită duratei mari de viață a acestor izotopi de plutoniu (evenimentele de dezintegrare sunt foarte rare), cantitatea acestor deşeuri din miezul bombelor ar trebui să fie foarte mică şi, oricum, mai puțin periculoasă decât însuşi izotopul ^{239}Pu.

Dezintegrarea beta a ^{241}Pu formează ^{241}Am, iar acumularea de americiu este probabil să devină o nouă problemă deoarece dezintegrările plutoniului şi americiului sunt atât gamma emițătoare (crescând expunerea externă a lucrătorilor) cât şi alfa emițătoare, putând cauza generare de căldură. Oricum, plutoniul poate fi separat de americiu prin diferite procese (extracții piro-chimice, extracții cu solvenți apoşi sau organici etc.)

Puțină fizică a deşeurilor nucleare ...

Radioactivitatea tuturor deşeurilor nucleare scade în timp. Toți radioizotopii conținuți în deşeuri au un timp propriu de înjumătățire, tendința de evoluție fiind, cel puțin teoretic, către elemente neradioactive. Multe elemente radioactive din combustibilul „ars" (de exemplu ^{239}Pu) rămân periculoase pentru om şi celelalte viețuitoare timp de sute de mii de ani. Alți radioizotopi rămân periculoşi chiar milioane de ani. Prin urmare, aceste deşeuri trebuie ecranate şi izolate de mediu pe durate de milenii. Alte elemente, cum ar fi ^{131}I, au timpi de înjumătățire scurți (8 zile în cazul ^{131}I) şi vor înceta să fie o problemă mai repede decât cei cu viață lungă, dar activitatea lor inițială este mult mai mare.

Cu cât mai repede se dezintegrează un radioizotop, cu atâta este el mai radioactiv. Energia şi tipul radiaţiilor ionizante emise de o substanţă radioactivă pură sunt importante în decizia privind cât este ea de periculoasă. Proprietăţile chimice ale elementului radioactiv vor determina cât de mobilă este substanţa şi cât de probabil este să se împrăştie în mediul înconjurător şi să contamineze corpul uman. Această situaţie se complică în continuare prin faptul că mulţi radioizotopi nu se dezintegrează imediat către un produs stabil ci mai degrabă către un alt produs de dezintegrare radioactiv, putând avea de a face, deci, cu o dezintegrare în lanţ.

... Şi foarte puţină biochimie

Ameninţarea la adresa sănătăţii, cauzată de expunerea la activitatea dată a unui radioizotop depinde de modul său de dezintegrare şi de biochimia acestuia. De exemplu, izotopul de scurtă durată ^{131}I este un emiţător beta şi gamma, dar deoarece el se concentrează în glanda tiroidă, poate să producă necazuri mai mari decât TcO_4 care, fiind solubil în apă, este eliminat rapid prin urină. Într-o manieră similară, actinidele emiţătoare alfa şi radiul sunt considerate foarte dăunătoare deoarece tind să aibă timpi biologici de înjumătăţire lungi şi radiaţiile lor se caracterizează prin valori ridicate ale energiilor de transfer. Datorită acestor diferenţe, regulile de determinare a leziunilor biologice diferă în mare măsură de la un radioizotop la altul şi, uneori, depind şi de însăşi natura compusului chimic care conţine radioizotopul respectiv.

Între filozofie şi ficţiune

Obiectivul principal în managementul deşeurilor radioactive (şi nu numai) este de a proteja populaţia şi mediul înconjurător. Aceasta înseamnă izolarea sau diluarea deşeurilor astfel încât concentraţia oricărui tip de radionuclizi să nu producă ameninţări la adresa biosferei. Pentru a obţine aceste deziderate, tehnologia preferată este îngroparea deşeurilor la mare adâncime; s-au sugerat de asemenea utilizarea unor tehnici de transmutaţie, stocare cu recuperare ulterioară, sau chiar „aruncarea" în spaţiul extraterestru.

Fraza care le însumează pe toate este că deşeurile trebuie „să fie izolate de om şi mediul său înconjurător până când acestea s-au dezintegrat atât de mult încât nu mai prezintă nici un pericol".

În literatura şi cinematografia de ficţiune, deşeurile radioactive sunt adesea citate ca modalitatea de a dobândi puteri şi abilităţi supraomeneşti; exemple în acest sens sunt filmele „Probleme moderne" din 1981 şi „Spider-man" din 2002.

În realitate, expunerea la nivele înalte de radioactivitate a deşeurilor poate să cauzeze serioase pericole sănătăţii, chiar moartea. Este interesant de notat că tratarea unui animal adult cu radiaţii, sau alte medicamente cauzatoare de mutaţii, cum ar fi citotoxicele şi anti-canceringenele, nu pot cauza transformarea acestuia într-un mutant. Este mai probabil ca adultului să i se inducă o boală cancerigenă.

Pentru corpul omenesc s-a calculat că o doză de 1 Sv are probabilitatea de 5% de a cauza cancer şi 1% de a cauza mutaţii în gameţi, sau ca gameţii să fabrice celule modificate care să se transmită astfel generaţiei următoare. Dacă un organism în dezvoltare, cum ar fi un copil încă nenăscut, ar fi iradiat, atunci este posibil să se inducă defecte „din naştere", dar este prea puţin probabil ca aceste defecte să se găsească în gameţi sau într-o celulă fabricată de un gamet.

Tipuri de deşeuri radioactive

Deşi nu sunt semnificativ radioactive, rămăşiţele de uraniu din fabricile de măcinare şi prelucrare mecanică sunt deşeuri. Sunt subproduse ale procesului de prelucrare a minereului de uraniu şi pot conţine şi metale grele, periculoase din punct de vedere chimic, cum ar fi plumbul şi arsenicul.

- Deşeul de nivel (radioactiv) scăzut (Low Level Waste – LLW)

Deşeul LLW este generat de spitale şi industrie, dar şi de ciclul de combustibil nuclear. Cuprinde hârtie, cârpe, scule, îmbrăcăminte, filtre etc. care conţin cantităţi mici de radioactivitate cu viaţă scurtă. În mod comun, deşeul LLW este desemnat astfel ca o măsură de precauţie dacă provine dintr-o regiune a unei „arii active" care, în mod frecvent, include birouri cu posibilităţi reduse de a deveni contaminate cu materiale radioactive. Astfel de deşeu LLW nu este, în mod normal, mai radioactiv decât unul provenind din „arii neactive", adică din alte birouri normale. Deşeul LLW nu necesită ecrane de protecţie atunci când este manevrat şi transportat şi poate fi îngropat mai aproape de suprafaţă. Pentru reducerea volumului său, este

adesea compactat sau incinerat înainte de depozitare. Deşeul LLW este împărțit în patru clase: A, B, C şi GTCC care înseamnă „Greater Than Class C" (mai mare decât clasa C).

- Deşeul de nivel (radioactiv) intermediar (Intermediate Level Waste – ILW)

Deşeul ILW conține cantități mari de radioactivitate şi în unele cazuri cere ecranare. Deşeul ILW include rășini, reziduuri chimice şi metale de armare / placare a combustibilului, cum ar fi materialele contaminate de la dezafectarea unui reactor. Deşeul ILW trebuie solidificat în beton sau bitum pentru depozitare. Ca o regulă generală, deşeurile slab radioactive cu viață scurtă pot fi îngropate mai la suprafața pământului, pe când cele cu viață lungă sunt îngropate la adâncime. Deşeul ILW nu este definit în Statele Unite, termenul fiind utilizate doar în Europa şi pe celelalte continente.

Se obişnuieşte în industria nucleară ca deşeul ILW să fie tratat cu schimbători de ioni sau cu alte substanțe pentru a concentra radioactivitatea în interiorul unui volum cât mai mic. După aplicarea unui astfel de tratament se obține o masă compactă cu mult mai puțin radioactivă, ce poate fi depozitată în condiții optime de siguranță. De exemplu, pentru a îndepărta metalele radioactive din mixturi apoase se poate folosi hidroxid feric (precipitat floconos). După absorbția radioizotopilor în hidroxidul feric, precipitatul rezultat se pune în bidoane metalice şi se amestecă cu ciment, obținându-se un deşeu solid. În vederea creşterii stabilității mecanice pe termen lung, în loc de ciment normal (ciment portland + pietriş + nisip) se foloseşte un amestec format din: ciment portland + cenuşă sau zgură de furnal.

- Deşeul de nivel (radioactiv) înalt (High Level Waste – HLW)

Deşeul HLW este produs de reactoarele nucleare. El conține produşi de fisiune şi elemente transuranice generate în miezul reactorului. Este puternic radioactiv şi adesea termic fierbinte. Deşeul HLW conține peste 95% din radioactivitatea totală produsă în procesul de generare nucleară de electricitate.

- Deşeul transuranic (Transuranic Waste – TRUW)

Deşeul TRUW, aşa cum este el definit în Statele Unite, este, fără a ține cont de originile sale, deşeul care este contaminat cu radionuclizi transuranici emițători alfa, cu timpi de înjumătățire mai mari de 20 de ani şi aflați în concentrații mai mari de 100 nCi/g, ecluzând deşeul HLW.

Elementele care au numărul atomic mai mare decât uraniu se numesc transuranice. Datorită timpilor lor de înjumătățire mari, deşeul TRUW este depozitat cu mai mare precauție decât deşeul de nivel mediu sau intermediar. În Statele Unite, deşeul TRUW provine mai ales din producția de arme nucleare şi constă din îmbrăcăminte, scule, cârpe, reziduuri şi alte obiecte contaminate cu cantități mici de elemente radioactive (în principal plutoniu). Deşeul TRUW este împărțit, în Statele Unite, în: „cu mânuire prin contact" (contact-handled – CH) şi „cu mânuire de la distanță" (remote-handled – RH) funcție de doza de radiații măsurată la suprafața containerului de deşeu. Deşeul TRUW-CH are un debit al dozei nu mai mare de 200 mrem/h, în timp ce deşeul TRUW-RH are un debit al dozei mai mare sau egal cu 200 mrem/h.

Managementul deşeului HLW

- Stocarea

Deşeul HLW este stocat temporar în bazine de calmare (combustibilul ars) şi transferat apoi în facilități de stocare uscată (în butoaie). Acest lucru permite radioizotopilor cu viață scurtă să se dezintegreze înaintea manipulărilor ulterioare.

- Vitrifierea

Stocarea de lungă durată a deşeului radioactiv impune stabilizarea acestuia într-o formă care nici să nu reacționeze şi nici să nu se degradeze în timp. Unor astfel de cerințe li se poate răspunde numai prin vitrifiere. În mod curent, deşeul HLW este amestecat cu hidratat de carbon (zahăr) şi apoi calcinat. Calcinarea presupune trecerea deşeului printr-un tub rotitor încălzit. Scopul calcinării este de a evapora apa din deşeu şi de a de-nitra produşii de fisiune pentru a ajuta producerea sticlei.

„Calcinatul" obținut este trimis în mod continuu către un furnal încălzit prin curenți de inducție ce conține cioburi de sticlă. Amestecul rezultat este o substanță nouă, în care deşeul va fi închis ermetic după răcire. Acest produs, aflându-se încă sub formă de topitură, este încărcat în

containere cilindrice de oţel inoxidabil. În timpul răcirii topitura se solidifică (se vitrifiază), transformându-se în sticlă. Această sticlă este foarte rezistentă la apă (ar fi nevoie de 1 milion de ani pentru ca 10% din această sticlă se dizolve în apă).

După umplerea unui cilindru, acesta se sigilează (plombează) prin sudură. Cilindrul este apoi spălat, inspectat sub aspectul contaminării externe şi amplasat în depozite subterane la mare adâncime. În acest fel deşeul HLW va rămâne imobilizat pentru mii de ani.

Sticla din cilindrii este în mod uzual o substanţă neagră, lucioasă. Zahărul este adăugat pentru a controla chimia ruteniului şi pentru a opri formarea oxidului volatil RuO_4 care conţine ruteniu radioactiv. În Vest, sticla este un boro-silicat similar sticlei Pyrex, în timp ce în fostul bloc sovietic se foloseşte o sticlă fosfatică. Cantitatea produşilor de fisiune din sticlă trebuie să fie limitată deoarece unii (paladiu, unele metale din grupa plumbului şi teluriu) tind să formeze faze metalice care se separă de sticlă.

- Roca sintetică (Synroc)

Roca sintetică (Syntetic rock – Synroc) reprezintă o cale mai sofisticată de a imobiliza astfel de deşeuri şi acest proces poate deveni comercial pentru deşeul civil (a început să fie folosit de armata Statelor Unite). Roca sintetică conţine minerale de tipul piroclorului şi critomelanei. Forma originală a rocii sintetice (synroc C) a fost proiectată pentru deşeuri HLW lichide. Principalele minerale din această rocă sintetică sunt holandit ($BaAl_2Ti_6O_{16}$), zirconolit ($CaZrTi_2O_7$) şi perovskit ($CaTiO_3$). Zirconolitul şi perovskitul sunt „gazdele” actinidelor. Stronţiu şi bariu vor fi fixaţi în perovskit, iar cesiul va fi fixat în holandit.

- Depozitarea în straturi geologice

Procesul de selectare a celor mai bune depozite finale, în roci de adâncime, pentru deşeul radioactiv este în curs de realizare în numeroase ţări, darea lor în exploatare urmând să se realizeze cel mai devreme după 2010.

Opţiunile pentru depozitarea deşeului radioactiv pe fundul mării includ: fie îngroparea în straturi stabile abisale, fie îngroparea în zonele de subducţiune care vor transporta deşeul în interiorul mantalei Pământului, fie îngroparea pe o insulă (naturală sau construită exact în acest scop) depărtată de aşezările umane. Chiar dacă toate aceste opţiuni sunt meritorii şi ar putea constitui o soluţie internaţională a iritantei probleme a depozitării deşeului

radioactiv, ele nu sunt luate în serios datorită barierelor legale, în America de Nord şi Europa ideea depozitării pe fundul mării devenind tabu.

O soluție mult mai fezabilă, care are meritul de a elimina complet problema deşeului HLW, este depozitarea în minele originare de unde a fost extras minereul de uraniu.

- Transmutația

Au fost propuneri de realizare a unor reactoare are să consume deşeul nuclear şi să-l transmute în alt tip de deşeu, mai puțin periculos. În particular, reactorul rapid integral (IFR) are un ciclu de combustibil nuclear care nu produce deşeu transuranic. O altă propunere, considerată mai sigură dar aflată de abia în curs de cercetare, se referă la reactoarele subcritice dedicate transmutării elementelor transuranice.

Se dezvoltă, de asemenea, studii teoretice privind folosirea reactoarelor de fuziune, aşa numitele „arzătoare de actinide". Astfel, plasma unui astfel de reactor (tokamak) ar putea fi dopată cu mici cantități de atomi de transuranice minore ce ar urma să fie transmutate în elemente mai uşoare prin bombardare cu neutroni de foarte înaltă energie, aceştia din urmă fiind produşi prin fuziunea deuteriului cu tritiu.

- Reutilizarea deşeului

Altă opțiune este de a găsi aplicații ale izotopilor din deşeul nuclear în vederea reutilizării lor. Deja, ^{137}C, ^{90}Sr, ^{99}Tc şi alți câțiva izotopi sunt extraşi pentru unele aplicații industriale (iradierea alimentelor).

- Depozitarea în spațiu extraterestru

Depozitarea în spațiul extraterestru este o posibilitate atractivă deoarece îndepărtează permanent deşeul radioactiv din mediul înconjurător. Totuşi, este în mod semnificativ dezavantajoasă, cel puțin datorită unei defecțiuni catastrofice a vehiculului lansat în spațiu. Mai mult, numărul mare de nave lansate face propunerea impracticabilă. Dar cea mai complicată problemă este înțelegerea internațională asupra reglementărilor ce ar trebui impuse unui asemenea program.

Accidente implicând deşeul radioactiv

Deoarece deşeul radioactiv nu este atât de amenințător încât să provoace distrugeri ca un reactor nuclear, el este adesea tratat ca un deşeu normal, uitându-se că reprezintă totuşi un pericol. Unele incidente au avut loc tocmai pentru faptul că materialul radioactiv a fost depozitat impropriu, sau pur şi simplu abandonat, sau chiar furat din depozitul de deşeuri.

Măturarea materialelor radioactive abandonate a fost cauza unor numeroase alte cazuri de expunere la radiații, cele mai multe în rândul națiunilor în curs de dezvoltare. Acestea din urmă au mai puține reglementări privind substanțele periculoase (şi mai puțină educație generală despre radioactivitate şi pericolele sale) şi nu au o piață a materialelor măturate, respectiv a deşeurilor metalice. Măturătorii şi cei care cumpără astfel de materiale sunt inconştienți că materialul este radioactiv şi este selectat doar pentru valoarea sa estetică sau aplicativă.

Alții sunt conştienți de radioactivitatea materialelor, dar ignoră riscul sau cred că valorile de iradiere sunt în afara de pericol. Iresponsabilitatea unor utilizatori de materiale radioactive (din spitale, universități sau unități militare) şi absența unor reglementări privind deşeurile radioactive, sau neaplicarea unor asemenea reglementări, au fost factori decisivi pentru accidente de iradiere (exemplu: accidentul Goiânia).

Accidentele din timpul transportului combustibilului ars de la Centralele Nuclearo-Electrice nu sunt probabil să aibă consecințe serioase datorită rezistenței recipientelor de transport.

CENTRALA NUCLEARO – ELECTRICĂ

O Centrală Nuclearo-Electrică (CNE) funcționează asemănător cu o Centrală Termo-Electrică, cu diferența că în primul caz sursa de căldură este reprezentată de unul au sau mai multe reactoare nucleare (în prezent, doar de) fisiune.

Toate CNE lucrează mai bine când puterea debitată este constantă (puterea reactorului putând fi scăzută odată cu scăderea puterii consumate în rețeaua electrică – noaptea).

Puterea unui reactor dintr-o CNE poate varia între 40 MWe şi peste 1.000 MWe. O CNE tipică are unități de 600 ÷ 1.200 MWe. În Finlanda, la Olkiluoto a început construcția celui mai puternic reactor, FIN5, tip PWR de 1.600 MWe.

În anul 2006 existau 4242 de reactoare nucleare de putere licențiate să opereze în 31 de țări ale lumii, producând aproape 17% din necesarul mondial de energie electrică.

Statele Unite, de exemplu, produc cea mai mare cantitate de energie nucleară, dar care acoperă numai 20% din consumul intern de electricitate. Prin comparație, necesarul de electricitate din Franța era acoperit, în anul 2006, în proporție de 80%, numai din producția Centralelor Nuclearo-Electrice.

Avantaje şi dezavantaje

Avantajele CNE asupra celorlalte surse de energie sunt:

- Nu există emisii de gaze poluante (în timpul unei operări normale) – acestea fiind emise numai pe perioada de testare a Generatoarelor Diesel de Urgență (procesele de extragere şi prelucrare a minereului de uraniu, precum şi construcția sau

demolarea unei CNE produce cantități relativ mici de astfel de poluanți)

- Nu poluează aerul – producția de gaze periculoase cum ar fi monoxidul de carbon, bioxid de sulf, aerosoli, mercur, oxizi de azot, particule sau fum fotochimic fiind nulă
- Generarea de deşeuri solide în cantități mici (în timpul unei funcționări normale)
- Costuri scăzute ale combustibilului – deoarece cantitatea de combustibil este totuşi mică
- Posibilitatea folosirii de baterii nucleare.

În acelaşi timp, însă, o CNE are şi importante dezavantaje, cum ar fi:

- Riscul unui accident major – un exemplu de cea mai proastă posibilă situație fiind ceea ce s-a întâmplat la CNE de la Cernobîl
- Poate ajuta la fabricarea de bombe nucleare – toate proiectele de reactoare pot produce plutoniu, ajutându-se prin aceasta fenomenul proliferării nucleare
- Costuri inițiale mari
- Costuri ridicate de mentenanță
- Costuri ridicate pentru dezafectarea CNE
- Poluare termică

Controverse

Energetica nucleară este puternic controversată, până într-atât încât, în Statele Unite şi cele mai multe țări de Europa de Vest, construcția de noi centrale a încetat, măcar şi temporal. La nivelul anului 2006 se construiau CNE noi doar în Argentina, Rusia, Finlanda, Bulgaria, Ucraina, România şi în unele țări asiatice. „Avocații" pro şi contra CNE folosesc în disputele lor înseşi avantajele şi dezavantajele amintite mai sus.

Costul beneficiilor unei CNE sunt un alt aspect al disputei. Se acceptă că aceste costuri sunt mari şi comparațiile dintre sumele utilizate pentru necesarul de combustibil (nuclear şi clasic) sunt slab fundamentate. Susținătorii CNE se bazează pe costurile scăzute de operare, în timp ce oponenții lor susțin că numeroasele sisteme de siguranță impun creşterea semnificativă a costurilor de operare.

Depozitarea combustibilului ars şi a deşeurilor radioactive reprezintă pentru unii susținători ai CNE drept avantaje datorită cantităților mici de astfel de deşeuri, comparativ cu cantitatea deşeurilor generate de tehnologiile clasice, iar costul depozitării este mic în raport cu valoarea energiei produse. Pentru alții, combustibilul ars şi deşeul radioactiv reprezintă dezavantaje deoarece mediul înconjurător nu poate fi protejat față de riscul unor viitoare scurgeri de radioactivitate din depozitele pe termen lung (depozite finale).

Despăgubiri în caz de accident nuclear

Convenția de la Viena privind „Civil Liability for Nuclear Damage" aduce în prim plan problema de interes internațional a răspunderii civile în cazul unor pagube nucleare. Cu toate acestea, țări deținătoare a majorității CNE din lume, incluzând aici Statele Unite, Rusia, China şi Japonia, nu sunt parte a nici unei convenții internaționale privind răspunderea nucleară.

De exemplu, în Statele Unite, asigurarea pentru incidente nucleare sau radiologice este acoperită numai pentru facilitățile licențiate începând cu anul 2005.

În Marea Britanie, dispoziții privind răspunderea civilă există încă din anul 1965, prin care se prevede plătirea de către operatorul CNE a unor compensații pentru distrugeri de maximum 150 milioane lire sterline, la care se pot adăuga alte despăgubiri plătite de Guvern, într-un cuantum de până la 300 de milioane de lire sterline.

Cu toate acestea ...

Deşi construcția de CNE cunoscuse un important declin după accidentele de la Three Mile Islande (1979) şi Cernobîl (1986), totuşi, în urma diminuării treptate a resurselor de combustibili fosili şi creşterii prețurilor acestora, pe de o parte, şi datorită realizării unor proiecte mai sigure de reactoare nucleare, respectiv a slabelor emisii de gaze cu efect de seră, pe de altă parte, în momentul de față asistăm la reînvierea interesului pentru acest tip de centrale, unele fiind deja în construcție şi altele în curs de planificare.

O opțiune energetică de viitor (şi subiect ce va fi abordat, cu siguranță, în cadrul aceluiaşi tip de discuții „pro" şi „contra") vor fi Centralele Electrice bazate pe fuziunea nucleară controlată.

Dacă în reacția de fisiune, un nucleu greu se scindează, în reacția de fuziune avem de a face cu „unirea” a două nuclee uşoare. Mai exact, atunci când două nuclee uşoare se apropie foarte mult unul de altul, există posibilitatea ca ele să fuzioneze, transformându-se într-un nucleu unic, mai greu, şi emițându-se o cantitate foarte mare de energie.

Deoarece această reacție implică acțiunea forțelor nucleare tari, fuziunea nu poate avea loc decât la temperaturi şi densități de nuclee foarte mari. Reacții nucleare de fuziune au loc în mod natural numai în stele.

În domeniul militar, **fuziunea nucleară necontrolată** este aplicată deja la armele termonucleare (bomba cu hidrogen).

Deşi cercetările în domeniul fuziunii nucleare controlate se desfăşoară încă din 1950, nu se aşteaptă realizarea de reactoare de comerciale înainte de anul 2050.

ACCIDENTE NUCLEARE

Acest capitol prezintă accidentele importante ce au avut loc în legătură cu instalaţii nucleare şi materiale radioactive. În unele cazuri există şi emisii de contaminare radioactivă, dar în cele mai multe accidente este vorba despre surse închise sau emisiile de radioactive sunt mici, în timp ce iradierile directe sunt largi.

Datorită politicii privind secretele de stat şi economice (de afaceri) din toate ţările lumii, nu este posibil să se determine cu certitudine frecvenţa sau dimensiunea unor asemenea evenimente ce au avut loc în istoria anterioară a industriilor ce lucrează cu radiaţii.

Accidentele şi incidentele mai noi, ce au produs daune materiale, leziuni sau moarte în rândul populaţiei, sau contaminări ale mediului înconjurător tind să fie documentate bine de către Agenţia Internaţională pentru Energia Atomică (IAEA – International Atomic Energy Agency) de la Viena.

Datorită naturii diferite a evenimentelor, este mai bine să se împartă acestea în *accidente nucleare* şi *accidente cu radiaţie*.

Un exemplu de accident nuclear poate fi acela în care miezul reactorului este deteriorat, ca în cazul Three Mile Island (Statele Unite), în timp ce un accident cu radiaţie poate fi orice eveniment, începând cu cel ce poate să apară în timpul realizării unei radiografii şi terminând cu scăparea unei surse într-un râu.

Aceste accidente cu radiaţie, cum ar fi mânuirea neglijentă a unei surse radioactive folosite la realizarea radiografiilor, sunt mai probabile să cauzeze daune serioase, atât operatorului cât şi publicului, decât foarte bine cunoscutele accidente nucleare.

Accidentele cu radiaţie sunt mult mai comune decât accidentele nucleare şi sunt adesea limitate în dimensiuni. De exemplu, un muncitor de la Soreq Nuclear Research Center (Israel) a absorbit o doză similară celei absorbite timp de o zi de un muncitor de la CNE Cernobîl (Ucraina). Totuşi,

deoarece la Soreq sursa emițătoare gamma nu a putut părăsi incinta de beton cu pereți de 2 m grosime, aceasta nu a afectat şi alți muncitori.

Tipuri de accident

- Pierderea agentului de răcire (LOCA – Loss of coolant accident)

LOCA este un accident catastrofic pentru reactorul nuclear, facilitățile de producție şi imediata lor vecinătate. În fiecare CNE există un al doilea sistem de răcire la avarie a zonei active (Emergency Core Cooling System – ECCS), destinat să intervină în caz de accident LOCA. Reactoarele nucleare generează căldură internă; pentru a converti căldura în energie utilă se foloseşte un sistem de răcire. Dacă agentul de răcire este pierdut, reactorul nuclear poate să continue generarea de căldură până când temperatura ajunge la punctul de distrugere a reactorului.

Un pericol particular este posibilitatea ca temperaturile înalte să împiedice sistemele de control să scadă intensitatea reacției în lanț; dacă acest lucru se întâmplă, temperatura va continua să crească până la producerea unui eveniment drastic: (a) în prezența apei, aceasta poate să fiarbă şi să spargă tubulatura; (b) în prezența grafitului şi a aerului, grafitul se poate aprinde şi, arzând, să împrăştie contaminare radioactivă; (c) combustibilul şi miezul reactorului se poate topi, iar dacă topitura continuă să genereze căldură, există posibilitatea ca aceasta să topească fundul vasului reactorului şi fundația acestuia şi să se scurgă în pământ (sindromul China).

Cele trei cazuri prezentate anterior conduc la definirea a trei măsuri extreme de apărare şi intervenții în vederea reducerii puterii termice a reactorului în caz de accident LOCA: (a) pe durata de timp necesară apei să fiarbă; (b) pe durata de timp necesară combustibilului să se topească; (c) pe durata de timp necesară topiturii să străpungă fundația reactorului.

Alte posibile accidente, mai puțin grave dar la fel de importante pentru populație şi mediul înconjurător sunt:

- Accident cauzat de căldura de dezintegrare (Decay heat accident)

Accidentele cauzate de căldura de dezintegrare apar atunci când aceasta din urmă produce daune.

- Accident de transport

Accidentele de transport pot să cauzeze eliberarea de radioactivitate, deteriorarea ecranelor de protecție, contaminare şi iradiere directă. De exemplu, transportarea cu autobuzul a unei surse defecte de radiații gamma (destinată obținerii radiografiilor) şi iradierea pasagerilor din autobuz.

- Accident cauzat de defectarea echipamentului

Defectarea echipamentului este un tip de posibil accident, un caz cunoscut fiind proasta funcționare a părții electronice (arderea unei simple diode semiconductoare) asociate unui accelerator de particule folosit la tratamentul cancerului (cel puțin un pacient a fost supraexpus). Un alt caz relatat este accidentul legat de existența deficiențelor de programare a unui produs software destinat controlului unui echipament medical utilizat în radioterapie (deficiența a fost descoperită după eliminarea, în cazul unui nou proiect, a unei interblocări analogice de securitate).

- Accident cauzat de eroarea umană

Eroarea umană poate fi responsabilă pentru unele accidente cum ar fi, de exemplu, calculul greşit al activității unei surse folosite în terapia medicală. Acest lucru ar putea conduce la absorbirea de către pacient a unei doze periculoase de radiații gamma. Mai mult, în cazul radioterapiei, chiar şi subexpunerea este un accident deoarece pacientul nu beneficiază de tratamentul prescris. Erori umane cu efecte mai grave au avut loc şi în actualele CNE.

- Accident cauzat de pierderea sursei radioactive

În cazul unui accident de acest tip, sursa radioactivă este pierdută, uitată sau abandonată. O asemenea sursă poate să cauzeze daune populației sau mediului înconjurător.

- Accident neclasificabil

Unele accidente nu pot fi clasificate. Ele apar atunci când se întâmplă lucruri neaşteptate cu sursa radioactivă. De exemplu, dacă o pasăre înşfacă o microsursă radioactivă ce conține radiu de pe pervazul unei ferestre şi apoi zboară cu ea, întorcându-se la cuibul său, unde moare după

scurt timp datorită iradierii directe, atunci avem de a face cu un accident de radiație minor. Deoarece actul plasării sursei pe pervazul ferestrei a fost evenimentul care a permis accesul păsării la sursă, nu este clar cum poate fi clasificat un astfel de eveniment: dacă este un eveniment de „pierdere a sursei" sau altceva. Un alt exemplu în acest sens este cel al unei surse medicale de radiu înghițite de un porc, sursa fiind până la urmă recuperată. Alte accidente neclasificabile sunt cele „normale industrial", dar în care a fost antrenat şi material radioactiv.

Scala Internațională a Evenimentului Nuclear (INES – International Nuclear Event Scale)

Scala INES a fost introdusă de IAEA pentru a permite comunicarea promptă a informației semnificative din punct de vedere al siguranței în cazul accidentelor nucleare. Pentru asigurarea unei raportări coerente a evenimentelor nucleare de către diferite autorități oficiale, au fost definite un număr de criterii şi indicatori.

Scala INES cuprinde 7(8) nivele şi anume:

- Nivelul 7 – Accident major (accident maxim credibil): *Impact larg în afara locației, efecte răspândite asupra sănătății şi mediului*.
- Nivelul 6 – Accident serios: *Eliberare semnificativă de radioactivitate în afara locației, cel mai probabil impunând implementarea totală de contramăsuri planificate.*
- Nivelul 5 – Accident cu risc în afara locației: *Eliberare limitată de radioactivitate în afara locației, cel mai probabil impunând implementarea parțială de contramăsuri planificate*, sau *Deteriorare severă a miezului reactorului sau a barierelor radiologice.*
- Nivelul 4 – Accident fără risc în afara locației: *Impact minor în afara locației rezultând din expunerea publicului la nivele în limitele prescrise*, sau *Deteriorare semnificativă a miezului reactorului sau a barierelor radiologice, sau expunere fatală a unui muncitor.*
- Nivelul 3 – Incident serios: *Un impact foarte mic în afara locației, expunere a publicului la nivele sub limitele prescrise*, sau *Împrăştiere severă a contaminării în interiorul locației şi / sau efecte acute de sănătate la unul sau mai mulți muncitor,* sau

Este un eveniment „aproape de accident”, cu urmări ce nu afectează siguranța.

- Nivelul 2 – Incident: *Acesta este un incident fără impact în afara locației, dar cu posibilă împrăştiere semnificativă a contaminării în interiorul locației*, sau *Supraexpunere a unui lucrător,* sau *Incidente cu deteriorări semnificative ale echipamentelor de securitate.*
- Nivelul 1 – Anomalie: *Aceasta este o anomalie în afara regimului autorizat de operare*.
- Nivelul 0 – Deviație, fără relevanță de siguranță: *Acesta este un eveniment fără semnificație, „sub scală”. Sunt de asemenea şi evenimente fără relevanță în siguranță, caracterizate ca fiind „în afara scalei”.*

Cele mai documentate accidente nucleare, civile

- Anii 1950 – 1960

12 Decembrie 1952 : Primul accident nuclear serios apărut la reactorul AECL NRX din Chalk River, Canada. Defectarea unei bare de oprire a reactorului combinată cu unele erori de operare au condus la o excursie de putere majoră, mai mare decât dublul puterii normale de ieşire a reactorului. Apa grea folosită ca moderator a fost purjată, oprind reacția în mai puțin de 30 secunde. Un defect al sistemului de acoperire cu gaz a condus la explozii de hidrogen care au deteriorat sever interiorul reactorului. Au fost eliberați produşii de fisiune din aproximativ 30 kg de uraniu. În interiorul clădirii reactorului s-a scurs apă uşoară radioactivă din sistemul de răcire; aproape 4.000 m^3 de apă radioactivă au fost pompați într-o arie de depozitare pentru a evita contaminarea râului Ottawa. Nu au existat victime imediate şi nici îmbolnăviri după accident. Muncitorii nu au suferit efecte pe termen lung.

4 Mai 1858 : La reactorul NRU Chalk River, Canada, datorită unei răciri inadecvate, o bară combustibilă defectă a luat foc şi a fost ruptă în două atunci când s-a încercat îndepărtarea sa din miez. Focul a fost stins dar nu înainte de eliberarea unei cantități sesizabile de produşi de combustie radioactivi, care au contaminat interiorul clădirii reactorului şi, într-un grad mult mai mic, o anumită suprafață din jurul locației. Peste 600 de oameni au fost folosiți pentru curățenie.

1959 : În Statele Unite, un reactor răcit cu sodiu a suferit străpungerea parțială a pardoselii de către topitura provenită din miez, la Santa Susana Field Laboratory, lângă Simi Valley, statul California.

- Anii 1960 – 1970

5 Octombrie 1966 : Pe malul lacului Erie, lângă Monroe, statul Michigan, o disfuncționalitate a sistemului de răcire cu sodiu a reactorului nuclear reproducător demonstrativ Enrico Fermi a cauzat topirea parțială a miezului. Accidentul a fost atribuit unei piese de zirconiu care obtura un ghid de curgere în sistemul de răcire cu sodiu. Două din cele 105 bare combustibile s-au topit pe durata incidentului, dar nu s-a înregistrat contaminare în afara vasului reactorului.

Mai 1967 : Unitatea 2 a CNE Chapelcross cu reactor Magnox din Dumfries şi Galloway Scoția, a suferit o scurgere de topitură când o bară combustibilă s-a defectat şi a luat foc după o reîncărcare a unității. După incident, reactorul a fost oprit timp de doi ani pentru reparații.

21 Ianuarie 1969 : O disfuncționalitate a agentului de răcire în reactorul nuclear experimental (aflat sub pământ), la Lucens, Cantonul Vaud, Elveția. Nu au rezultat pagube sau răniți. Caverna a fost puternic contaminată şi a fost închisă etanş.

1 Mai 1969 : O valvă disfuncțională a cauzat o inundație în CNE Ågesta (tip PHWR) dintr-o suburbie a Stockolm-ului, Suedia. Inundația cu 400 m^3 de apă de răcire în camera turbinei a oprit turbina şi a cauzat scurtcircuite în mai multe funcții de control făcându-le inoperabile. Reactorul a fost oprit manual. Ca un rezultat al accidentului, aproximativ 500 litri de apă grea s-a pierdut prin valva defectă.

- Anii 1970 – 1980

22 Februarie 1977 : CNE cehoslovacă A1 de la Jaslovske Bohunice a suferit un accident de nivel INES 4 în timpul încărcării combustibilului. Ca urmare, centrala a fost oprită şi dezafectată.

28 Martie 1979 : Defectarea unor echipamente şi greşeli efectuate de muncitori au condus la pierderea de agent de răcire (accident LOCA) şi topirea parțială a miezului reactorului nuclear Three Mile Island din Middletown, statul Pennsylvania. Acesta este cel mai dur accident nuclear civil din Statele Unite. Expunerea la radiații în jurul locației a fost sub 100 mrem (= 1 mSv, mai mică decât expunerea anuală datorată surselor naturale), iar expunerea populației (aproximativ 2 milioane de oameni) de 1

mrem (= 10 μSv). Nu au existat victime imediate şi nici îmbolnăviri ulterioare de cancer.

- Anii 1980 – 1990

Martie 1981 : Mai mult de 100 de muncitori au fost expuşi unor doze de până la 155 mrem/zi cu ocazia reparării unei CNE japoneze de la Tsuruga, depăşindu-se limita zilnică maxim admisibilă într-o CNE.

25 Ianuarie 1982 : La CNE Ginna din Rochester, statul New York, operată de Rochester Gas & Electric Company, s-a spart o țeavă a generatorului de abur, împrăştiindu-se agent de răcire radioactiv pe duşumeaua centralei. Cantități mici (aproape 80 Ci sau 3 TBq) de abur radioactiv a fost eliberat în aer.

23 Septembrie 1983 : În Argentina, la Buenos Aires, o eroare de operare făcută în timpul reconfigurării combustibilului a condus la un accident critic la facilitatea RA-2 a unui reactor experimental de testare. A fost urmat de o excursie de 3×10^{17} fisiuni; operatorul a absorbit o doză de 2000 rad (20 Gy) de radiație gamma şi 1700 rad (17 Gy) de radiație de neutroni din cauza căreia a şi murit două zile mai târziu. Alte 17 persoane din afara camerei reactorului au absorbit doze variind între 1 ÷ 35 rad (0,01 ÷ 0,35 Gy).

26 Aprilie 1986 : Cel mai puternic accident din istoria energeticii nucleare a avut loc la CNE de la Cernobîl, lângă Kiev în fosta URSS, actualmente Ucraina. Incendiul şi exploziile rezultate în urma unui experiment neautorizat a condus la 31 de decese, acestea fiind doar consecințe imediate. Material nuclear radioactiv a fost împrăştiat deasupra unei mari părți a Europei. Peste 135.000 de locuitori au fost evacuați din zona centralei şi peste 800.000 din zonele cu depuneri radioactive din Ucraina, Belarus şi Rusia. O suprafață de aproximativ 10.000 km^2 de teren a fost scoasă din utilizare pentru o durată nedefinită de timp.

4 Mai 1986 : Un reactor THTR-300 HTGR de 300 MWe din localitatea germană Hamm-Uentrop a eliberat radiație după ce una din granulele sferice de combustibil s-a blocat în conducta de alimentare cu combustibil a reactorului. Acțiunile operatorului destinate dislocării granulei au condus la deteriorarea învelişului protector al acesteia, radiația eliberată fiind detectată până la 2 km distanță de reactor.

17 Decembrie 1987 : A avut loc un accident termic la CNE Biblis din Hesse, Germania.

21 Noiembrie 1988 : Un accident în care aproape că s-a ajuns la scurgere de topitură a avut loc în Germania de Est, la Greifswald.

19 Octombrie 1989 : În Spania, la CNE Vandellos de lângă Tarragona, a avut loc un incendiu, eveniment fără eliminare externă de radioactivitate, fără deteriorarea miezului reactorului şi fără contaminare în interiorul CNE. Totuşi deteriorarea, din cauza focului, a sistemelor de securitate ale centralei a degradat semnificativ apărarea în adâncime.

- Anii 1990 – 2000

6 Aprilie 1993 : La Tomsk, în Rusia, la fabrica de reprocesare a plutoniului Siberian Chemical Entreprise, o creştere rapidă de presiune a condus la o defecţiune mecanică explozivă ce a avut loc într-un vas de reacţie din oţel inoxidabil de 34 m^3. Vasul se afla într-un buncăr din beton şi conţinea un amestec de acid nitric concentrat, 8757 kg de uraniu, 449 g de plutoniu, alături de deşeuri radioactive şi organice rămasa de la ciclul precedent de extragere. Explozia a creat o gaură largă în plafonul clădirii şi a dislocat acoperişul de beton al buncărului, eliberând în mediul înconjurător aproximativ 6 GBq de ^{239}Pu şi 30 TBq de alţi radionuclizi. Accidentul a expus la radiaţii 160 de muncitori din locaţie şi aproximativ 200 de muncitori veniţi să cureţe locul, la o doză totală de până la 50 mSv (limita maximă de doză de radiaţii pentru un muncitor este de 100 mSv absorbită pe o perioadă 5 ani. Norul de contaminare s-a extins 28 km în direcţia NE faţă de clădire, din care 20 km erau proprietate a fabricii. Micul sat Georgievka (200 locuitori) a fost limita până la care s-a raportat norul radioactiv, dar nu fost victime, răniri sau alte îmbolnăviri.

30 Septembrie 1999 : A avut loc cel mai grav accident nuclear la fabrica de reprocesare a uraniului din Tokai-mura, prefectura Ibaraki, la NE de Tokyo. Cauza directă a accidentului critic a fost punerea de către muncitori, într-un tanc de precipitare, a unei soluţii de nitrat de uranil conţinând aproape 16,6 kg de uraniu, excedând masa critică. Tancul nu era proiectat să dizolve acest tip de soluţie şi nu a fost prevăzut să prevină eventuala criticitate. Muncitorii au fost expuşi la o doză în exces de radiaţii de neutroni (doi dintre ei au murit); cel puţin 116 au absorbit doze cel puţin de 1 mSv sau chiar mai mult.

- Anii 2000 – 2006

15 Februarie 2000 : Reactorul nr.2 de la CNE Indian Point din Buchanan, New York, a descărcat o cantitate mică de abur radioactiv cauzată de ruperea unui tub al generatorului de abur. Nu s-a observat radioactivitate detectabilă în afara reactorului.

9 Februarie 2002 : Doi muncitori au fost expuşi unei cantităţi mici de radiaţii şi au suferit arsuri minore din cauza incendiului ce a avut loc la CNE Onagwa din prefectura Miyagi, Japonia. Focul a apărut la subsolul reactorului nr.3 pe parcursul inspecţiei de rutină când o canistră cu substanţă inflamabilă a fost înţepată accidental şi s-a aprins o bucată de masă plastică.

10 Aprilie 2003 : Pierderi de radioactivitate la CNE maghiară Paks.

19 Aprilie 2005 : La Sellafield, în Marea Britanie, 20 de tone de uraniu şi 160 kg de plutoniu dizolvate în 83.000 litri de acid nitric au fost picurate fără să fie detectate pe parcursul a mai multor luni dintr-o ţeavă spartă în interiorul unui rezervor din oţel inox la centrala de reprocesare a combustibilului Thorp. Combustibilul ars procesat parţial a fost golit într-un tanc de reţinere din afara centralei.

Septembrie 2005 : La Dounrey, în Marea Britanie, s-a încheiat cimentarea centralei în interiorul căreia se vărsaseră 266 de litri de reziduuri radioactive. În luna octombrie a aceluiaşi an alte laboratoare de reprocesare din locaţie au fost închise după ce opt muncitori au fost detectaţi pozitiv din punct de vedere al urmelor radioactive.

25 Iulie 2006 : O defecţiune electrică a oprit prompt CNE Forsmark din Suedia. Au apărut unele probleme în timpul opririi. S-a spus că a fost cel mai serios incident nuclear de după Cernobîl şi că a fost o pură întâmplare faptul că s-a prevenit topirea miezului reactorului.

Cele mai documentate accidente cu radiaţie, civile

- Înainte de 1950

Marie Curie (7 Noiembrie 1867 – 4 Iulie 1934) a fost un pionier al studiului radioactivităţii, devenind mai târziu de două ori laureată a premiului Nobel pentru fizică şi chimie. A murit în 1934 în urma anemiei cauzate aproape sigur de expunerea masivă la radiaţii, atâta vreme cât în laboratoare nu se luau măsuri adecvate de securitate şi nici nu cunoşteau încă pericolele presupuse de o asemenea activitate. Se ştie, de exemplu, că ea transporta în buzunar tuburi de testare pline cu izotopi radioactivi şi le păstrat în sertarul biroului său.

Radiul luminescent a fost utilizat pentru accentuarea indicațiilor ceasurilor şi „pictarea" altor lucruri care, astfel, „luminau", fără a se cunoaşte pericolele implicate. Cel mai faimos incident a fost „fetele de radiu" din Orange-New Jersey, dar şi în alte oraşe, cum ar fi Ottawa-Ilinois, au avut loc contaminări ale caselor sau a altor structuri.

Contaminarea cu radiu a unor străzi din Denver-Colorado a avut loc în urma activităților de minerit şi manufacturare a minereului.

- Anii 1950 – 1960

Martie 1957 : Muncitorii de la o companie americană din Huston, licențiată pentru încapsularea surselor de camere radioactive, au fost expuşi la pudră de ^{192}Ir (rezultând arsuri de la radiații la doi muncitori expuşi direct). Pudra a fost împrăştiată, apoi, în comunitate, în câteva case şi maşini. Incidentul a fost raportat în Look Magazine abia în 1961.

Septembrie 1957 : În URSS a avut loc accidentul de la Kyshtym, lângă Chelyabinsk. În urma exploziei unui tanc cu deşeuri, aproape $7{,}4\times10^{17}$ Bq de produşi radioactivi au fost aruncați în atmosferă, formând un nor radioactiv de un kilometru.

- Anii 1960 – 1970

21 Ianuarie 1969 : În Lucens, Elveția un reactor de putere pilot a suferit un accident LOCA şi topirea parțială a miezului. Aproape toată radiația a rămas închisă în interiorul cavernei ce conținea reactorul. A fost un accidente de nivel INES 4.

- Anii 1970 – 1980

16 Iulie 1979 : La a 34-a aniversare a testului Trinity, în Church Rock, New Mexico, s-a prăbuşit digul de apărare (din pământ) al rezervorului de calmare a morii de uraniu. Rezervorul depăşise durata de viață proiectată şi licențiată şi era umplut cu 60 cm peste nivelul proiectat, sfidându-se crăparea evidentă. Incidentul a condus la vărsarea a aproape 380.000 de m^3 de lichide radioactive şi 1.100 tone de deşeuri solide, care s-au împrăştiat pe o distanță de aproape 100 de km.

29 Septembrie 1979 : Scurgeri de tritiu la Atomic America, în Tucson, Arizona; la şcoala publică de peste stradă au fost contaminate alimente în valoare de 300.000 de dolari; s-au făcut măsurători la prăjiturile

de ciocolată ce aveau 56 nCi/l, față de limita de securitate de 20 nCi/l (740 Bq/l) admisă pentru apa potabilă (dacă se beau 2 litri pe zi).

- Anii 1980 – 1990

11 Februarie 1981 : Un muncitor nou angajat a deschis, în mod necugetat, o valvă şi peste 380 m^3 de apă slab radioactivă a curs în clădirea reactorului nr.1 al CNE americane operate de Tehhessee Valley Authority din Sequoyah. Un număr de 14 muncitori au intrat în contact cu apa scursă.
Martie 1981 – Peste 100 de muncitori au fost expuşi unor doze de radiații mai mari de 155 mrem pe zi în timpul reparării unei CNE în Tsuruga, Japonia, depăşindu-se limita de 100 mrem (1 mSv) pe zi.

Iulie 1981 : La Lycoming, în Nine Mile Point, New York, un tanc supraîncărcat cu deşeuri lichide a fost deversat în mod deliberat în subsolul clădirii cu deşeuri, cauzând răsturnarea unor rezervoare ce se aflau deja în subsol şi vărsarea conținutului acestora. Aproape 190 m^3 de apă slab contaminată a fost deversată în lacul Ontario.

1982 : La International Neutronics din Dover, New Jersey, s-a deversat o cantitate necunoscută de soluție conținând cobalt radioactiv, folosită pentru: tratarea culorii pietrelor prețioase, modificări chimice şi sterilizare a alimentelor şi a instrumentarului medical. Soluția a fost deversată în sistemul (canalul) de colectare din Dover şi a forțat închiderea centralei.

6 Decembrie 1083 : În Juarez Mexico, un rezident local a recuperat materiale dintr-o instalație terapeutică dezafectată, transportând 6.000 de pastile (bile) cu ^{60}Co. Demontarea şi transportul materialului a condus la contaminarea severă a maşinii sale. Când maşina a fost dată la fier vechi, au fost contaminate alte 5.000 de tone de metal cu o activitate estimată la 300 Ci (11 TBq). Acest material a fost vândut ca material de construcții, unele cantități ajungând până în Statele Unite şi Canada. Incidentul a fost descoperit câteva luni mai târziu la Los Alamos, în momentul când o maşină ce livra materiale de construcții către National Laboratory a trecut accidental printr-o stație de monitorare a radiațiilor. S-a măsurat apoi contaminarea drumurilor utilizate pentru transportul originalei surse de radiații. În unele cazuri, bile de ^{60}Co au fost încastrate în asfaltul drumului. În statul Sinaloa, 109 case au fost condamnate datorită construirii lor cu material contaminat.

Între 1985 şi 1987 : Atomic Energy of Canada Limited (AECL) a produs Therac-25, o instalație destinată radioterapiei. Se cunosc cel puțin şase accidente ce au avut loc între anii 1985 şi 1987, în care pacienții au

primit masive supradoze de radiații, în unele cazuri de ordinul sutelor de Gray. Cel puțin patru pacienți au murit din cauza acestor supradoze. Aceste accidente au scos la iveală greşeli în programul de control (software) al sistemului se securitate.

6 Ianuarie 1986 : La centrala de reprocesare a combustibilului Kerr-McGee din Gore, Oklahoma, un cilindru cu hexaflorură de uraniu s-a aprins după o încălzire improprie. Un muncitor a murit din cauza expunerii chimice, iar alții 30 au fost răniți.

În 1986 : A fost revocată licența centralei Radiation Technology Inc. din New Jesey pentru violarea siguranței la locul de muncă. A fost ocolit un dispozitiv de siguranță destinat prevenirii intrării muncitorilor în camera de iradiere pe durata operării. Un muncitor a primit o doză aproape letală de radiații.

Ianuarie 1987 : Un student al Universității Columbia a sustras şi a ascuns în ceasul deşteptător al unui coleg de cameră ^{238}U radioactiv dintr-un laborator din subsol, unde Enrico Fermi şi-a condus primele experimente de fisiune. Investigațiile nu au găsit vătămări ale persoanelor sau daune materiale, dar studentul a fost exmatriculat.

13 Septembrie 1987 : În accidentul de la Goiânia, Brazilia, gunoierii desfac o instalație de radioterapie dintr-o clinică abandonată. După care vând sursa de ^{137}Cs (40 TBq) ca pe o curiozitate „care încălzeşte”. În patru zile 400 de persoane au fost contaminate.

6 Iunie 1988 : La sediul Radiation Sterilizers din Decatur, Georgia, s-a raportat o pierdere de ^{137}Cs. A trebuit să fie recuperate de la utilizator 60.000 de containere medicale şi cutii pentru lapte. Zece muncitori au fost expuse şi trei au contaminat alte suprafețe, din locuințe şi maşini proprii.

5 Februarie 1989 : Trei muncitori au fost expuşi la radiații gamma provenite de la o sursă de ^{60}Co într-o centrală de iradiere a produselor din San Salvador. Cea mai expusă persoană a murit în timp ce altele două şi-au pierdut membrele. Acesta a fost un accident cauzat de eroarea umană în care o persoană a făcut proasta alegere de a intra în camera de iradiere.

- Anii 1990 – 2000

24 Iunie 1990 : La Soreq, în Israel, un operator dintr-o instalație de iradiere comercială a ocolit sistemele de siguranță ale sterilizatorului JS6500 pentru a remedia blocajul apărut în zona transportorului de produse. A rezultat o expunere de 1 ÷ 2 minute pe întreg corpul cu o doză estimată la 10 Gy sau mai mult. Operatorul a murit 36 de zile mai târziu în ciuda eforturilor medicale extensive făcute.

26 Octombrie 1991 : În Nesvish, Belarus, un operator dintr-o stație atomică de sterilizare a ocolit sistemele de securitate pentru a curăța un transportor înțepenit. Deoarece a intrat în camera de iradiere, el a fost expus la o doză pe tot corpul de 11 Gy, unele părți ale corpului primind şi 20 Gy. Îngrijirea medicală promptă l-a mai ținut în viață 113 zile.

6 Aprilie 1993 : La stația rusească Tomsk-7 Siberian Chemical Entreprise, destinată reprocesării plutoniului, o creştere rapidă de presiune a condus la explozia vasului de reacție din oțel inoxidabil (34 m^3) dintr-un buncăr de beton din clădirea 201. Vasul conținea un amestec concentrat de acid nitric, uraniu (8757 kg) şi plutoniu (449 g) împreună cu deşeuri organice radioactive rămase de la ciclul anterior de extracție. Explozia a dislocat plafonul de beton al buncărului şi a făcut o gaură largă în acoperiş, eliberând în atmosferă aproximativ 6 GBq de ^{239}Pu şi 30 TBq de alți radionuclizi. Accidentul a expus 160 de operatori şi alți aproape două sute de muncitori veniți să facă curățenie la o doză totală de 50 mSv (limita de doză pentru muncitori este de 100 mSv în 5 ani). Norul de contaminare s-a extins 28 km în direcția NE față de clădirea 201, din care 20 km erau proprietate a fabricii. Micul sat Georgievka (200 locuitori) a fost limita până la care s-a raportat norul radioactiv, dar nu au fost victime, răniri sau alte îmbolnăviri.

31 August 1994 : La Commerce Township, Michigan, reactorul experimental al lui David Hahn a fost descoperit în depozitul original. Reactorul neecranat a expus vecinătatea sa la nivele de radiații de 1.000 de ori mai ridicate decât nivelul normal.

21 octombrie 1994 : O sursă mare de ^{137}Cs este găsită şi furată de măturătorii de stradă dintr-un depozit de deşeuri metalice din Tammiku din Estonia.

16 Noiembrie 1996 : Proba rusească Martie-96 eşuează în încercarea atingerii orbitei, după care urmează căderea şi arderea deasupra Americii de Sud. Două surse RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator – generator termoelectric cu radioizotopi) conținând 200 g de ^{238}Pu, proiectate să reziste la reintrarea în atmosferă, se presupune că se găsesc undeva în Deşertul Atacama.

Mai 1998 : La stația de reciclare Acerinox din Cádiz, Spania, au avut loc scăpări involuntare de resturi metalice conținând surse radioactive; norul radioactiv s-a îndreptat tot timpul către Elveția înainte de a fi detectat.

1999 : Un drum de lângă Mrima Hill, Kenya, a fost reconstruit folosind materiale locale găsite, mai târziu, ca fiind radioactive. Câțiva muncitori au fost expuşi la radiații excesive, iar mulți rezidenți din zonă au

fost monitorizaţi pentru acest fel de expunere. Au fost îndepărtate 2.975 de tone de material de la suprafaţa drumului pentru eliminarea pericolelor.

- Anii 2000 – 2006

9 Februarie 2002 : Doi muncitori au fost expuşi la o cantitate mică de radiaţie şi au suferit arsuri minore în timpul unui incendiu ce a avut loc la CNE japoneză Onagawa, prefectura Miyagi.

11 Martie 2002 : O sursă de 2,5 tone conţinând ^{60}Co a fost transportată de la spitalul Cookridge din Leed, Maria Britanie, la Sellafield cu defecte de ecranare. Deoarece radiaţia a scăpat din transport prin partea de jos, în materialul drumului, nu există păreri că evenimentul ar fi cauzat îmbolnăviri la om sau animale. Acest eveniment a fost tratat într-o manieră serioasă deoarece tipul de protecţie „în adâncime" al sursei a fost erodat. Dacă containerul ar fi căzut pe drum atunci un fascicul de radiaţii gamma ar fi fost emis într-o direcţie în care ar fi putut iradia oameni.

2003 : În Rusia, la capul Navarin, un generator termoelectric cu radioizotopi (RTG) localizat pe malul arctic a fost găsit într-o înaltă stare de degradare. Nivelul dozei de expunere la suprafaţa generatorului a fost de 15 R/h; în Iulie 2004 o a doua inspecţie a măsurat 87 R/h şi a observat că ^{90}Sr începea să se scurgă în mediul înconjurător. În Noiembrie 2003 a fost găsit un alt generator RTG complet dezmembrat localizat pe insula Yuzhny Goryachinsky. Sursa generatorului a fost găsită pe pământ, pe litoralul din partea nordică a insulei.

10 Septembrie 2004 : În Rusia, la Yakutia, două RTG au căzut de la o înălţime de 50 m dintr-un elicopter ce executa un zbor deasupra tundrei de pe insula Zemlya Bunge. La impactul cu solul au fost compromise ecranele la radiaţie externă. La 10 m deasupra locului impactului, intensitatea radiaţiilor gamma a fost măsurată de 4 mSv/h.

3 Noiembrie 2005 : La Haddam, Connecticut, în Statele Unite. Compania The Connecticut Yankee Atomic Power raportează că apă conţinând cantităţi (sub limita admisă pentru apa potabilă) de ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{90}Sr şi tritiu s-au scurs dintr-un rezervor de combustibil ars.

11 Martie 2006 : La Fleurus, în Belgia, un operator care lucra la compania Steringenics, la o instalaţie de sterilizare a echipamentului medical, a intrat în camera de iradiere şi a rămas acolo timp de 20 secunde. Camera conţinea o sursă de ^{60}Co care nu se afla în piscina cu apă. Trei săptămâni mai târziu operatorul a prezentat simptome tipice unei iradieri (vomă, pierderea părului, oboseală). S-a estimat că a fost expus la o doză

între 4,4 şi 4,8 Gy cauzată de proasta funcţionare a sistemului de menţinere a sursei în piscină. Accidentul a fost de gradul 4 pe scala INES.

16 Martie 2006 : Statul Illinois a amendat Corporaţia Exelon pentru scăpări repetate de tritiu în apa descărcată în împrejurimi de CNE Braiwood. Corporaţia a arătat că pierderile sunt în limite legale, dar a acceptat să despăgubească proprietarii din vecinătate. Tritiul a fost produs în timpul operării normale şi a fost descărcat legal, cu apă cu bor, într-un râu din apropiere.

5 Mai 2006 : O eliberare accidentală de gaz cu iod radioactiv la o CNE din Minnesota a expus aproape o sută de muncitori la radiaţii de nivel scăzut. Cei mai mulţi muncitori au primit 10 ÷ 20 mrem (0,1 ÷ 0,2 mSv), asemănător unei radiografii dentare cu raze X. Muncitorii au avut echipament de protecţie şi nu au existat scurgeri de radiaţie în afara centralei, în mediul înconjurător.

Cele mai documentate accidente nucleare şi cu radiaţii, militare

- Anii 1940 – 1950

24 Iunie 1942 : La Leipzig, în Germania: Werner Heisenberg şi Robert Dopel au avut o explozie la pila atomică L-IV, din care a rezultat un incendiu de proporţii. Accidentul a avut loc în timpul unor investigaţii privind cinematica neutronilor. Instalaţia era inspectată pentru pierderi de apă grea în miez; în timpul inspecţiei s-a introdus accidental aer în miezul reactorului, conducând la aprinderea pudrei de uraniu din interior. Incendiul a cauzat fierberea apei grele şi a generat suficient abur pentru a deteriora o parte din reactor. Particule arzând de uraniu s-au împrăştiat prin laborator, cauzând un incendiu de proporţii.

21 August 1945 : Harry K. Daghlian Jr., lucrând la Los Alamos Omega, a creat accidental o masă supracritică când a scăpat o cărămidă de carbid de tungsten într-un miez de plutoniu. A îndepărtat rapid cărămida, dar a fost iradiat în mod fatal, murind pe 15 Septembrie acelaşi an.

21 Mai 1946 : Fizicianul canadian Louis Slotin a asamblat manual o masă critică de plutoniu în timp ce demonstra tehnica sa unor oameni de ştiinţă veniţi în vizită de la Los Alamos. A avut loc un accident de criticitate fatală. Slotin a murit pe 30 Mai din cauza masivei iradieri, estimată la o doză de 1.000 rad (10 Gy). Şase observatori, care au primit doze de până la 166 rad, au supravieţuit.

- Anii 1950 – 1960

11 Aprilie 1959 : Un bombardier B-29 transportând o bombă nucleară, patru detonatoare de rezervă şi un echipaj de 13 oameni s-a prăbuşit pe un munte de lângă Manzano Base în Albuquerque, New Mexico, la trei minute după decolarea de la baza aeriană Kirtland. Prăbuşirea a dus la un incendiu major care a fost raportat ca fiind vizibil de la mare distanţă. Bomba a fost distrusă complet şi explozivul ei a luat foc. Totuşi cele patru detonatoare şi alte componente nucleare au fost recuperate. Nu a fost posibilă a detonare nucleară deoarece miezul bombei, deşi se afla la bord, nu a fost montat în ogivă, din motive de siguranţă. Toţi cei 13 membri ai echipajului au murit pe loc.

10 Noiembrie 1950 : Un bombardier B-50 ce aducea înapoi una din mai multele bombe nucleare america Mark 4, depozitate în secret în Canada, a avut dificultăţi la motor şi a aruncat bomba de la 3.200 m. Bomba, transportând uraniu sărăcit dar fără miez de plutoniu s-a autodistrus la înălţimea de 750m şi a căzut deasupra St. Lawrence River, Quebec. Explozia a împrăştiat aproape 45 kg de uraniu sărăcit deasupra zonei respective.

1 Martie 1954 : În timpul testului nuclear de la Castel Bravo a primei bombe cu hidrogen, o greşeală de calcul a condus la o explozie de două ori mai mari decât cea calculată, cu o forţă explozivă totală de 15 megatone. Din totalul de 15 megatone, 10 megatone a fost din partea fisiunii reflectorului de uraniu natural, dar aceste reacţii de fisiune au dispărut repede, producând o cantitate mare de căderi radioactive. Randamentul mai mare decât cel estimat şi vântul au produs consecinţe foarte serioase. Căderile radioactive au fost împrăştiate asupra atolilor locuiţi Rongelap şi Rongerik care au fost rapid evacuaţi. Mulţi dintre nativii din insulele Marshall s-au născut cu malformaţii şi au primit unele compensaţii de la Guvernul federal. Un vas de pescuit japonez, Fifth Lucky Dragon, a intrat de asemenea în contact cu depunerile radioactive, cauzând îmbolnăvirea pescarilor. Accidentul a condus la discuţii internaţionale aprinse, Japonia punând chiar problema posibilităţii contaminării peştilor.

29 Noiembrie 1955 : O eroare de operare a condus la topirea parţială a miezului reactorului reproducător experimental EBR-I din Idaho, rezultând, temporar, nivele ridicate de radioactivitate în clădirea reactorului şi necesitând reparaţii semnificative.

27 Iulie 1956 : Un bombardier B-47 s-a prăbuşit peste un depozit ce conţinea trei bombe nucleare Mark 6 la RAF Lakenheath, explodând şi împrăştiind combustibil arzând (de la bombe). A fost un miracol că

detonatoarele de pe una din bombe nu au lucrat, şi nu s-a eliberat astfel material nuclear în mediul înconjurător.

11 Septembrie 1957 : Un incendiu major la o instalaţie militară de la Rocky Flats, la 27 km de Denver, a pornit dintr-o boxă cu mănuşi şi s-a împrăştiat prin sistemul de ventilaţie în filtrele de coş. Plutoniu şi alţi contaminanţi au fost eliberaţi, dar nu se ştie cantitatea exactă: estimările variază între 25 mg şi 250 kg.

29 Septembrie 1957 : O defecţiune a sistemului de răcire apărută la un tanc de stocare a deşeurilor nucleare a condus la o explozie la centrala rusească de reprocesare a combustibilului ars de la Mayak, lângă Chelyabinsk. Explozia, estimată a avea energia a 75 tone de TNT a eliberat 20 MCi de radioactivitate şi a expus la radiaţii de nivel înalt între 124.000 şi 270.000 de oameni.

8-12 Octombrie 1957 : Pila nr.1 Windscale de la Sellafield, Cumbria (Maria Britanie) a început un proces de coacere şi eliberare a energiei Wigner din moderatorul de grafit al reactorului. Reactorul care a ars era unul din cele două reactoare cu uraniu natural, răcite cu aer folosite pentru producţia de plutoniu. Tehnicienii au încălzit greşit pila reactorului deoarece senzori de temperatură, prost instalaţi, indicau că reactorul era răcit în timp ce el de fapt se încălzea, fapt ce a condus la defectarea unei casete nucleare ce a permis reacţionarea cu aerul a uraniului şi a grafitului iradiat. Incendiul s-a menţinut patru zile, arzând o porţiune semnificativă din miezul reactorului. Aproape 150 de celule combustibile nu au putut fi îndepărtate din miezul reactorului, dar operatorii au reuşit să întrerupă focul înlăturând alte celule din apropiere. Un riscant efort a fost depus pentru răcirea cu apă a miezului reactorului ce a dus până la urmă la oprirea incendiului. Pe durata incendiului s-au eliberat în atmosferă gaze radioactive, mai ales ^{131}I. Distribuţia de lapte a fost interzisă pe o suprafaţă de 520 km^2 în jurul reactorului timp de câteva săptămâni. Un raport medical din 1987 prezicea că accidentul ar fi cauzat, mai târziu, moartea de cancer a 33 de persoane.

31 Ianuarie 1958 : În timpul unei simulări din Maroc, un avion american Force B-47 transportând o bombă nucleară a luat foc când din cauza ruperii unei roţi în momentul atingerii pistei de aterizare, după care a urmat o ruptură în tancul ce conţinea combustibil. Imediat după accident s-a detectat o oarecare contaminare.

5 Februarie 1958 : Un bombardier american B-47 transportând o bombă Mark 15, într-o simulare de misiune de război de la baza Homestead Air Force, s-a ciocnit cu un avion de vânătoare F-86. Pilotul din F-86 s-a paraşutat. Bombardierul B-47 a încercat de trei ori să aterizeze la baza Homestead Air Force înainte de a lua decizia de a arunca bomba în Oceanul

Atlantic, lângă Savannah, statul Georgia şi Tybee Island, statul Georgia. O suprafață de 3 mile pătrate de lângă Wassaw Sound a fost cercetată timp de 9 săptămâni în vederea găsirii bombei, însă fără nici un rezultat. Bomba a mai fost căutată şi în 2001 tot fără succes. În 2004 s-a anunțat că s-ar fi găsit pe fundul Oceanului un obiect despre care se crede că ar fi respectiva bombă.

11 Martie 1958 : Un bombardier american B-47 ce zbura pe deasupra Savannah, Georgia într-un exercițiu de rutină cu o ogivă nucleară, a avut o disfuncționalitate. Sistemul de prindere a bombei s-a defectat şi ogiva nucleară a căzut şi şi-a detonat partea chimică în apropierea suburbiei localității Florence, Carolina de Sud. Partea nucleară nu a detonat dar o cantitate minoră de substanțe radioactive a fost împrăştiată în zonă. În afară de distrugerea casei peste care a căzut şi unele răi minore, nu au apărut semne ale unor eventuale boli de radiație.

16 Iunie 1958 : Un accident de criticitate cu neutroni prompți a avut loc în aripa C-1 a clădirii 9212 de la complexul Oak Ridge Tennessee Y-12 în timp ce o cantitate supercritică din nitratul de uranil înalt îmbogățit era colectat într-un rezervor. S-a estimat că accidentul a produs $1{,}3\times10^{18}$ fisiuni. Opt lucrători au fost în apropierea rezervorului în timpul accidentului, primind o doză de neutroni de 30 ÷ 477 rem. Nu s-au raportat decese.

30 Decembrie 1958 : O soluție de plutoniu a fost asamblată accidental la masă critică în timpul unei purificări chimice la Los Alamos. Operatorul macaralei a murit datorită puternicei iradieri. În urma acestui accident s-a renunțat la operarea manuală a ansamblurilor critice.

20 Noiembrie 1959 : O explozie chimică a avut loc în stația de procesare chimică de la Oak Ridge National Laboratory, în Tennessee, în timpul decontaminării echipamentelor de procesare. În timpul accidentului s-a eliberat aproape 15 grame de ^{239}Pu.

- Anii 1960 – 1970

7 Iunie 1960 : La baza McGuire Air Force din New Egypt, New Jersey, un tanc de heliu a explodat şi a rupt şi rezervorul unei rachete sol-aer BOMARC-A. Incendiul a distrus racheta şi s-a contaminat zona directă de sub rachetă şi din jurul său.

13 Octombrie 1960 : Un submarin sovietic din clasa Northern Fleet November, aşa-numit şi K-8, era într-un exercițiu în Marea Barenț, când au apărut scăpări la generatorul de abur şi conducte ale circuitului de răcire. Până la refacerea (improvizată) a sistemului de răcire, gaze radioactive au

intrat în vas. Trei membri ai echipajului au suferit răni vizibile din cauza radiației, fiind expuşi la doze de până la 1,8 ÷ 2 Sv.

3 Ianuarie 1961 : Reactorul american de putere experimental militar SL-1 de la National Reactor Testing Station din Idaho, a atins criticitate promptă în timpul procedurilor de mentenanță şi a cauzat vaporizarea apei din jurul miezului reactorului. Bara de control şi partea de sus a vasului reactorului au fost aruncate în aer, omorând operatorul care lua parte la procedură. Doi militari ce supervizau operațiile de mentenanță au fost de asemenea uciși.

24 Ianuarie 1961 : Un bombardier american B-52 a suferit un incendiu cauzat de pierderea majoră de combustibil şi a explodat în aer la 20 km nord de baza Seymour Jonson Air Force din Goldsboro, statul Carolina de Nord. Accidentul a condus la eliberarea a două bombe cu hidrogen Mark 39. Patru piloți s-au paraşutat dar trei au murit, doi în avion şi unul în timpul aterizării. Trei din cele patru sisteme de armare ale unei bombe s-au anclanşat, determinând intrarea automată în funcțiune a altor sisteme, cum ar fi deschiderea paraşutei de încetinire. Paraşuta a permis bombei să lovească pământul cu defecțiuni minore. Al patrulea sistem de armare (butonul pilotului) nu a fost activat şi astfel bomba nu a detonat. A doua bombă a căzut într-un câmp cu noroi cu aproximativ 300 m/s şi s-a rupt în bucăți. Coada sa fost găsită la 7 m adâncime, fiind recuperată împreună inclusiv cu butelia pentru tritiu şi plutoniu. Totuşi excavările au fost abandonate din cauza acoperirii incontrolabile a pământului cu apă, astfel încât „scena termonucleară" conținând uraniu a fost părăsită. Aviația americană a cumpărat pământul respectiv şi l-a împrejmuit, supunându-l periodic la măsurători de contaminare.

4 Iulie 1961 : Submarinul sovietic K-19, a suferit un accident major după ce sistemul de răcire a reactorului s-a defectat (în apropierea coastelor Norvegiei). Incidentul a contaminat echipajul, părți ale vasului şi unele din rachetele balistice transportate la bord, rezultând unele răniri grave. Temperatura miezului reactorului a atins valoarea de 800 ^{o}C, aproape de punctul de topire a barelor de combustibil, echipajul reuşind până la urmă scăderea temperaturii prin proceduri de urgență.

21 Aprilie 1964 : Un satelit american de navigație Tansit-5BN-3, alimentat de la o sursă nucleară, a eşuat în încercarea de a atinge viteza de orbitare şi a reintrat în atmosferă în Oceanul Indian. Generatorul cu ^{238}Pu conținut de satelit (590 TBq) a ars, cel puțin parțial, la reintrarea în atmosferă. În stratosferă s-au detectat nivele crescute de ^{238}Pu.

Ianuarie 1965 : Un accident ce a avut loc la Lawrence Livermore National Laboratory a eliberat material radioactiv de 11 PBq (300 kCi).

Octombrie 1965 – Un incendiu la Rocky Flats a expus personalul la limita maximă de iradiere, pentru un timp de 17 ÷ 25 ori mai mare decât cel permis.

5 Decembrie 1965 : Un avion A-4E Skyhawk cu o bombă B43 la bord s-a prăbuşit în apele mării de la 4,9 km înălțime, în apropierea coastelor Japoniei. Avionul plecase din Vietnam către localitatea japoneză Yokosuka. Avionul, pilotul şi bomba nucleară nu au mai fost găsiți.

17 Ianuarie 1966 : Lângă localitatea spaniolă Palomares, în timpul unei reîncărcări cu combustibil în zbor, deasupra oceanului, un bombardier B-52 s-a ciocnit cu avionul-tanc USAF KC-135. Opt din cei 11 membri ai echipajului au murit. Întreaga cantitate de 150.000 litri de combustibil din avionul-tanc a ars. Distrugerea a două bombe cu hidrogen a condus la dispersarea de particule radioactive deasupra fermelor din apropiere, iar o bombă intactă a căzut lângă Palomares. A patra bombă a fost pierdută în apele mării, la 20 km de coastă. După căutarea timp de trei luni, implicând activitatea a 12.000 de oameni şi cea a submarinului american de cercetări DSV Alvin, această a patra bombă a fost recuperată. În timpul decontaminării, 1.500 de tone de pământ radioactiv şi plante (tomate) au fost transportate la un depozit de deşeuri nucleare din Aiken, statul Carolina de Sud. Statele Unite au plătit despăgubiri în valoare de 600.000 dolari pentru 522 de locuitori din Palomares, oraşul primind alte 200.000 de dolari pentru o stație de desalinizare.

Iarna 1966 – 1967 (dată necunoscută) : Spărgătorul de gheață Lenin, primul vapor sovietic pus în mişcare cu ajutorul energiei nucleare, a suferit un accident major (posibil topirea miezului) la unul din cele trei reactoare ale sale. S-a vorbit despre moartea a 30 de membri ai echipajului. Vasul a fost abandonat timp de un an pentru a permite scăderea nivelului radiațiilor înainte de a îndepărta cele trei reactoare şi a le depozita în apele mării Kara, în fiordul Tsivolko (60% din barele combustibile au fost împachetate într-un container separat). Spărgătorul de gheată a fost echipat cu alte două reactoare noi şi a reintrat în serviciu în 1970.

7 Ianuarie 1968 : La 11 km sud de baza Thule Air Force din Groenlanda, un incendiu a izbucnit în compartimentul de navigație al unui bombardier B-52 care s-a fisurat, a împrăştiat trei bombe cu hidrogen pe câmp şi a căzut în apa mării. După activitatea de decontaminare, îngreunată de vremea proastă din Groenlanda, gheața contaminată şi rămăşițe ale avionului au fost îngropate în Statele Unite. Fragmente de bombă au fost reciclate de Pantex, în Amarillo, statul Texas. Danezii au fost ultragiați de eveniment deoarece Groenlanda este posesiune daneză şi Danemarca a interzis bombele nucleare pe teritoriul său. Au avut loc masive demonstrații

împotriva Statelor Unite. O ogivă a fost recuperată de o navă americană abia în 1979. Un raport din August 2000 sugera că celelalte bombe vor rămâne pe fundul golfului Baffin.

24 Mai 1968 : Submarinul nuclear K-27 era lansat la apă. Pe parcursul testelor, reactorul nuclear a suferit o reducere de putere şi pe 24 Mai a avut loc o inexplicabilă cădere bruscă de putere. Încercările echipajului de a remedia situația au fost zadarnice. În acelaşi timp, radiațiile gamma din interiorul compartimentului reactorului au crescut la 150 rad/h. În timp au scăpat gaze radioactive din compartimentul reactorului către zonele de siguranță, nivelul radiațiilor la bordul întregului submarin crescând în mod constant. Reactorul a fost oprit şi aproape 20% din fasciculele combustibile au fost deteriorate. Incidentul a fost cauzat de probleme apărute în sistemul de răcire a miezului reactorului. Întregul submarin a fost scufundat în Marea Kara în 1981.

27 August 1968 : Submarinul nuclear sovietic K-140 din clasa Yankee se afla pentru reparații în docul naval de la Severodvinsk. Pe 27 August, a apărut o creştere necontrolată a puterii rectorului, în timpul activităților de refacere a vasului. Unul dintre reactoare a pornit automat când barele de control au fost ridicate pe poziții înalte. Puterea a crescut de 18 ori față de valoarea sa normală, în timp ce presiunea şi temperatura au crescut de patru ori. Pornirea automată a reactorului a fost cauzată, pe de o parte, de instalarea incorectă a cablurilor electrice ale barelor de control şi, pe de altă parte, de o eroare umană.

11 Mai 1969 : O cantitate de 5 kg de plutoniu a ars la Rocky Flats. Mii de autocamioane au fost folosite la transportul materialului contaminat la Idaho Falls, unde a fost vărsat în tranşeele necăptuşite ale unuia dintre cele mai semnificative straturi acvifere ale Statelor Unite.

24 Iulie 1969 : Un incendiu serios la AEC Nuclear Trigger Assembly Facility din Rocky Flats, statul Colorado, a dus la suspendarea producției de armament. Zona a fost contaminată cu plutoniu. Mai multe clădiri ale fabricii au devenit inutilizabile, iar mai târziu au fost dezafectate şi îngropate.

- Anii 1970 – 1980

12 Aprilie 1970 : Un submarin sovietic de atac K-8, aparent, a avut probleme la sistemul său de propulsie nucleară pe când se afla în Oceanul Atlantic. Echipajul submarinului a încercat să remorcheze un vas comercial avariat, dar a eşuat. Vasul s-a scufundat, şi au murit 52 de marinari.

12 Decembrie 1971 : În apele râului Tamisa, lângă Londra, a fost transferată agent de răcire radioactiv de la submarinul USS Dace într-un rezervor al submarinului USS Fulton. Cu această ocazie o cantitate de 1.900 litri de agent de răcire radioactiv s-a deversat în Tamisa.

Decembrie 1972 : Un incendiu major şi două explozii au avut loc la centrala americană de fabricare a plutoniului din Pawling, statul New York. Accidentul a cauzat contaminarea cu plutoniu a soluluii şi a centralei, aceasta fiind oprită, după stingerea incendiului, definitiv.

1975 : Vasul american USS Guardfish încearca să descarce în apa mării răşina sărăcită din sistemul său de purificare (folosită la dizolvarea mineralelor radioactive şi a particulelor provenite de la circuitele de răcire ale submarinelor). Vasul s-a contaminat atunci când vântul a vărsat răşina peste punte. Acest tip de accident a fost foarte comun; totuşi navele nucleare ale Statelor Unite nu au mai deversat răşină în apa mării.

Octombrie – Noiembrie 1975 : În timpul dezafectării submarinului de serviciu USS Proteus (scoatere din luptă), a avut loc o deversare de apă de răcire radioactivă în portul Apra, Guam. Un contor Geiger a indicat o doză de 50 de ori mai mare decât doza admisă la două din plajele publice din port.

August 1976 : O explozie la Hanford, statul Washington, a contaminat mai mulți muncitori de la Plutonium Finishing Plant. Centrala convertea soluție de nitrat de plutoniu în formă metalică pentru producția de arme nucleare. Explozia a spart un geam din sticlă cu plumb gros de 4 inch care ecrana muncitorii de materialele radioactive. Un muncitor de 64 de ani a fost stropit cu acid nitric şi cioburi radioactive de sticlă. Muncitorul a inhalat cea mai mare doză de americiu-241 înregistrată vreodată, adică de 500 de ori mai mult decât limita standard prevăzută pentru acest element. Muncitorul a fost izolat timp de cinci luni, sub tratament şi monitorizare permanentă. În 1977 radiația corpului său scăzuse cu aproape 80 de procente. Când s-a întors acasă (muncitorul), prietenii săi şi membrii bisericii l-au evitat. A trebuit să intervină ministrul de resort pentru a convinge populația că se poate sta în siguranță lângă muncitor. Muncitorul a murit din cauze naturale în 1987, la vârsta de 75 de ani.

1977 : Submarinul sovietic K-171 a eliberat accidental o ogivă nucleară pe când se afla lângă coasta Kamchatka. După o căutare frenetică ce a implicat zeci de vase şi avioane, ogiva a fost recuperată.

24 ianuarie 1978 : Satelitul sovietic de recunoaştere Cosmos 954, având la bord un reactor nuclear, a ars la reintrarea în atmosferă deasupra Canadei.

22 Mai 1978 : La bordul submarinului USS Puffer, lângă Puget Sound, statul Washington, o valvă s-a deschis din greşeală, eliberând până la 1.900 litri de apă radioactivă.

- Anii 1980 – 1990

8 August 1982 : Pe când se afla la datorie în Marea Barenţ, submarinul sovietic de clasă Alfa K-123 a avut o scurgere de agent de răcire (metal topit) la reactorul său. Accidentul a fost cauzat de o scurgere la generatorul de abur. Aproximativ două tone de aliaj s-au scurs în compartimentul reactorului, deteriorându-l în mod ireparabil, astfel încât acesta a trebuit să fie înlocuit. Au trebuit nouă ani pentru scăderea nivelului de radiaţii şi repararea submarinului.

3 Ianuarie 1983 : Satelitul sovietic de spionaj Kosmos 1402, cu reactor nuclear, a ars la reintrarea în atmosferă deasupra Atlanticului de Sud.
10 August 1985 – La aproape 55 km distanţă de Vladivostok, în golful Chazhma, un submarin sovietic din clasa Echo a avut o explozie la un reactor, producându-se înalte nivele de radiaţie fatală. Zece ofiţeri au murit, dar norul ucigaş de radioactivitate nu a atins oraşul Vladivostok.

1986 : Guvernul Statelor unite declasifică 10.000 de pagini din documente ce indicau că între 1946 şi 1986 Staţia Hanford din Richland, statul Washington a eliberat mii de metri cubi de lichide radioactive. Cei mai mulţi dintre cei 270.000 de locuitori din zona afectată au primit doze scăzute de radiaţii provenite de la radioizotopul ^{131}I.

3 Octombrie 1986 : La 770 km este de Bermude, submarinul sovietic K-219 a avut o explozie la unul dintre tuburile sale de rachete nucleare şi cel puţin trei membri ai echipajului au fost omorâţi. La bord se aflau 16 rachete nucleare şi două reactoare. Liderul sovietic Mihail Gorbaciov l-a informat în mod privat pe preşedintele Statelor Unite Roland Regan despre dezastru, înainte de anunţul public din data de 4 Octombrie. Pe 16 Octombrie submarinul s-a scufundat pe fundul Oceanului Atlantic la adâncimea de 5,5 km.

Octombrie 1988 : La staţia americană nucleară din Rocky Flats, statul Colorado, doi angajaţi şi un inspector de la Departamentul de Energie au inhalat particule radioactive. S-a dispus închiderea acesteia. Au fost citate câteva încălcări ale regulamentelor de securitate incluzând: utilizarea de monitoare necalibrate, folosirea de echipamente inadecvate în caz de incendiu şi contaminarea cu radioactivitate a pânzei freatice.

- Anii 1990 – 2000

Octombrie 1997 : Mai mulţi soldaţi georgieni au suferit arsuri datorate radiaţiilor. Ei se aflau la paza unor staţii de antrenament abandonate, uitate şi ne-etichetate după colapsul Uniunii Sovietice. Unul avea o bilă de ^{137}Cs într-un buzunar al mantalei, care iradia de 130.000 de ori mai puternic decât fondul natural la 1 m distanţă.

- Anii 2000 – 2007

Februarie 2003 : La staţia Oak Ridge Tennessee Y-12, în timpul fazei finale de testare a unei metode de procesare a sărurilor conţinând puţin uraniu, a avut loc o mică explozie urmată de incendiu. Explozia a apărut într-un vas fără supapă de eşapare ce conţinea calciu nereacţionat, apă şi uraniu sărăcit; o reacţie exotermică dintre aceste articole a generat suficient abur ca să explodeze containerul. Această mică explozie a condus la spargerea boxei cu mănuşi în care se afla vasul. Aerul filtrat provenit din boxa cu mănuşi conţinea pudră de uraniu care a luat foc (uraniul este piroforic), contaminându-se slab trei angajaţi.

SECURITATE NUCLEARĂ

Pentru a încheia această carte într-o notă optimistă, vom prezenta în continuare câteva elemente de bază privind atenția acordată problemelor de securitate şi siguranță în exploatare a unui reactor nuclear.

Securitatea[4] *nucleară* înglobează toate acțiunile desfăşurate pentru a preveni accidentele nucleare şi accidentele cu radiații, sau să limiteze consecințele acestora.

Toate națiunile care utilizează energia nucleară au instituții speciale de supraveghere şi reglementare a securității nucleare. Pe plan internațional, Agenția Internațională pentru Energia Atomică (AIEA), cu sediul la Viena, „acționează pentru utilizarea paşnică a ştiinței şi tehnologiei nucleare".

Cultivarea securității

Sintagma *Cultivarea securității* a fost introdusă de International Nuclear Safety Advisory Group (Grupul Consultativ pentru Securitate Nucleară Internațională) într-un raport publicat privind accidentul de la Cernobîl din 1986.

În 1991, AIEA defineşte „cultivarea securității" ca fiind „ansamblul de caracteristici şi atitudini ale unei organizații sau ale unei persoane individuale care stabileşte că, având prioritate de prim rang, problemele privind securitatea unei centrale nucleare primesc atenția garantată de semnificația lor."

O altă definiție citată adesea este cea a U.K. Health and Safety Commission (Comisia de Sănătate şi Securitate din Marea Britanie) conform căreia cultivarea securității „este produsul valorilor individuale şi de grup, atitudinile, percepțiile, competențele şi modelele de comportare

[4] În limba engleză se utilizează sintagma *nuclear safety*, englezescul *safety* putând fi tradus prin: *siguranță*, *securitate*, *pază* etc.; în literatura de specialitate românească s-a încetățenit sintagma *securitate nucleară*.

care determină angajarea, stilul şi îndemânarea managementului unei organizații de sănătate şi securitate / siguranță."

Sintagma „cultivarea securității" este folosită astăzi în Centralele Nuclearo-Electrice şi alte domenii caracterizate prin probleme de securitate critică precum aviația, industria şi, mai recent, medicina.

Cultivarea securității se referă atât la dezvoltarea atitudinii populației privind securitatea, cât şi la managementul performant al securității stabilit de organizații ce acționează pentru securitatea vieții unei comunități. O bună cultivare a securității implică o estimare constantă a semnificației securității evenimentelor şi scăpărilor astfel încât să poată fi precizat cel mai adecvat nivel de atenție. Stabilirea şi dezvoltarea atitudinilor pozitive privind cultivarea securității într-o comunitate presupun, până la urmă, nişte costuri eficiente.

Redundanța

Redundanța în inginerie constă în multiplicarea componentelor critice ale unui sistem cu intenția de creştere a siguranței în funcționare a sistemului, uzual în cazul siguranței de rezervă, sau la căderea acestuia.

În majoritatea sistemelor de siguranță critică, cum ar fi la avioane, unele părți ale sistemului de control trebuie triplicate. O eroare la o componentă poate fi eliminată de celelalte două componente. Într-un sistem cu triplă redundanță, sistemul are trei subcomponente şi va cădea numai dacă vor cădea toate trei componentele împreună (simultan). Atât timp cât fiecare din cele trei componente cade foarte rar şi independent, probabilitatea ca toate trei să cadă împreună este extrem de mică.

Redundanța mai este cunoscută prin sintagmele „Sisteme cu vot majoritar" sau „Logica votului".

Securitatea nucleară pasivă

Securitatea nucleară pasivă descrie caracteristica de siguranță a unui reactor nuclear care nu cere acțiunea operatorului uman sau feedback electronic (reacție inversă electronică) în vederea opririi în siguranță în cazul unui tip particular de urgență (uzual supraîncălzirea rezultată din pierderea agentului de răcire sau scăderea debitului de răcire). Aceste reactoare tind să fie tot mai sigure din punct de vedere al ingineriei componentelor, comportarea acestora în conformitate cu legile fizicii va

diminua (în loc să accelereze) în astfel de circumstanţe reacţia nucleară. Acest fapt este în contrast cu unele proiecte mai vechi de reactor unde tendinţa naturală a reacţiei nucleare era de a se accelera odată cu creşterea temperaturii, astfel încât feedback-ul lor electronic sau intervenţia operatorului erau strict necesare pentru prevenirea avarierii reactorului.

Securitatea activă

În inginerie, sistemele de *securitate activă* sunt acele sisteme care pot fi activate ca răspuns la o problemă de siguranţă sau eveniment anormal. Astfel de sisteme pot fi activate de operatorul uman, de un sistem de conducere automată cu calculatorul, sau chiar prin automatizare mecanică. În ingineria nucleară, siguranţa activă contrastează cu siguranţa pasivă prin aceea că ea presupune intervenţia unui operator uman sau cea automatizată prin intermediul unui calculator, în timp ce sistemele de siguranţă pasivă acţionează în virtutea legilor naturii pentru a face reactorul să răspundă la evenimentele dăunătoare într-o manieră favorabilă.

Apărarea în adâncime

Apărarea în adâncime este o strategie militară, uneori numită şi *apărare elastică*. Apărarea în adâncime caută mai degrabă să întârzie decât să prevină avansarea unui atacator, *câştigând timp* prin *cedare de spaţiu*. Ideea apărării în adâncime este utilizată azi şi în definirea strategiilor ne-militare.

De exemplu, o strategie de apărare în adâncime pentru prevenirea incendiilor nu se concentrează asupra tuturor resurselor, ci numai pe prevenirea apariţiei focului; în schimb, ea cere dezvoltarea de alarme la foc, extinctoare, planuri de evacuare, echipament mobil de intervenţie / salvare şi, eventual, planuri naţionale pentru desfăşurarea de resurse masive în caz de incendii majore, cum ar fi incendierea unei păduri.

Apărarea în adâncime poate însemna o soluţie inginerească care să accentueze redundanţa – un sistem care continuă să funcţioneze chiar dacă una din componentele sale a căzut – sau chiar să conducă la proiectarea de componente care să cadă foarte greu. De exemplu, un avion cu patru motoare va avea o probabilitate mult mai mică să se prăbuşească decât un avion cu un singur motor, oricât de mare ar fi efortul pentru a creşte siguranţa avionului cu un singur motor.

Clădirea container

O *clădire container*, în accepțiunea sa cea mai comună, este o structură de oțel sau beton care înconjoară reactorul nuclear. Este proiectată pentru a reține, în caz de urgență, scăpările de radiații până la presiuni de 410 ÷ 1.400 kPa).

Din punct de vedere al apărării în adâncime, clădirea container este bariera finală în calea eliberărilor de radioactivitate, prima fiind combustibilul ceramic însuşi, a doua tuburile metalice din care sunt fabricate elementele combustibile, a treia vasul reactorului şi sistemul de răcire.

Clădirea container este, în mod tipic, o structură etanşă din oțel ce închide reactorul, în mod normal lipsit de contact cu atmosfera exterioară. Învelişul de oțel este ecranat, la rândul său, împotriva unui atac cu rachete (obuze) prin intermediul unei structuri rezistente din beton.

Pentru un reactor PWR, clădirea container include, pe lângă reactorul în sine, şi generatorii de abur şi presurizorul şi reprezintă însăşi clădirea reactorului. Ecranul din jurul său, contra rachetelor, este în mod tipic o clădire cilindrică, fie foarte înaltă, fie acoperită cu o cupolă.

Pentru un reactor BWR, containerul şi ecranul contra rachetelor acoperă vasul reactorului. Pereții clădirii reactorului formează la rândul lor un container secundar în timpul operațiilor de reîncărcare cu combustibil. Proiectele de container sunt referite prin numele Mark I (vechi), Mark II şi Mark III (cel mai nou). Toate cele trei tipuri au un bazin mare cu apă folosită pentru a răci aburul eliberat din sistemul reactor în timpul fenomenelor tranzitorii.

Unitățile CANDU utilizează, în clădirea reactorului, un pulverizator de apă pentru condensarea rapidă a aburului provenit din orice spărtură şi aducerea clădirii la presiune subatmosferică. Aceasta minimizează posibilitatea ca produşii de fisiune să fie eliberați în atmosferă.

În fosta Uniune Sovietică nu s-au utilizat clădiri container. Acest lucru, împreună cu natura instabilă a reactorului RBMK, pot conduce la catastrofe precum accidentul de la Cernobîl.

Protecția contra radiației ionizante

Protecţia contra radiaţiilor, cunoscută şi sub numele de *radioprotecţie*, este ştiinţa de protecţie a populaţiei şi a mediului înconjurător împotriva efectelor nocive ale radiaţiei ionizante, care include atât radiaţia cu particule cât şi radiaţia electromagnetică de înaltă energie.
Ea include: radioprotecţia la locul de muncă a lucrătorilor, radioprotecţia medicală a pacienţilor şi radioprotecţia publicului, atât a fiecărui cetăţean în parte cât şi a populaţiei în întregul său.

Există trei principii de bază în protecţia contra radiaţiilor: principiul timpului, al distanţei şi cel al ecranării. Expunerea la radiaţii poate fi manageriată prin utilizarea uneia sau a mai multor dintre următoarele măsuri:

- reducerea timpului de expunere micşorează în mod proporţional doza efectivă: de exemplu, se reduce timpul de manipulare a sursei radioactive;
- creşterea distanţei reduce doza datorită legii pătratice inverse: de exemplu, folosirea unui forceps conduce la creşterea distanţei faţă de sursă, comparativ cu situaţia manipulării direct cu mâna;
- utilizarea de ecrane adiţionale poate reduce semnificativ doza de radiaţii: în cazul radiaţiilor X, mortarul de pe pereţii camerelor în care se află surse de raze X conţine sulfat de bariu, iar operatorii stau în faţa unei ecran din sticlă cu plumb şi poartă şorţuri cu plumb; în cazul radiaţiilor gamma şi al razelor X, aproape orice material poate fi folosit ca ecran dacă are grosime suficientă.

Din punct de vedere practic, protecţia contra radiaţiilor tinde să devină o îndeletnicire care, analizând cele trei principii, să se dedice identificării soluţiilor cu costuri eficiente.

În unele cazuri, ecranările improprii pot înrăutăţi situaţia, mai ales când interacţiunea radiaţiei cu materialul ecranului poate conduce la apariţia unor radiaţii secundare ce sunt absorbite de organism mult mai rapid.

Prin urmare, radiaţii ionizante diferite vor trebui să fie contracarate prin măsuri şi tehnici de ecranare diferite.

În 1928 a fost înfiinţat "The International X-Ray and Radium Protection Committee" (Comitetul Internaţional pentru Protecţia la Raze X şi Radiu) destinat elaborării de recomandări privind protecţia împotriva radiaţiilor. Acest comitet a fost reorganizat în anul 1950 sub numele de "International Commission on Radiological Protection" (ICRP = Comisia Internaţională de Protecţie Radiologică) format dintr-un preşedinte şi 12 membri aleşi pe baza recunoaşterii lor ca experţi în probleme de

radioprotecţie.

ICRP este acceptat ca fiind prima autoritate pe linie de radioprotecţie şi are responsabilitatea prezentării de recomandări în toate aspectele acestei probleme. În anul 1977 a fost publicat documentul ICRP-26 în care s-au stabilit dozele absorbite limită (admise) în cazul lucrului cu radiaţii.

În anul 1991 s-a publicat un nou document, ICRP-60, ca o revizuire importantă a ICRP-26, recomandându-se noi limite, mai scăzute, pentru dozele absorbite.

În ICRP-26 se arată că efectele biologice ale radiaţiilor se pot clasifica în "somatice" şi "ereditare". În ce priveşte efectele somatice, acestea se împart în:

- *efecte stohastice*, pentru care probabilitatea de apariţie, mai exact severitatea lor, depinde de doza absorbită, indiferent de valoarea acesteia.
- *efecte nestohastice*, a căror severitate variază cu doza absorbită, aceasta din urmă putând şi trebuind să fie limitată la anumite valori.

Cancerul, de exemplu, este un efect somatic stohastic. Probabilitatea de a contracta un cancer creşte odată cu doza absorbită, severitatea acestui efect biologic fiind aceeaşi, *indiferent de valoarea dozei cauzatoare*.

Cataracta, ca efect biologic al radiaţiilor este, de asemenea, stohastic, dar pragul dozei pentru o expunere cronică este de 8 Gy.

În contextul celor prezentate mai sus, rolul nemijlocit al radioprotecţiei este de a preveni efectele nestohastice şi de a limita probabilitatea de apariţie a efectelor stohastice la nivele socotite a fi acceptabile. Efectele nestohastice pot fi prevenite impunând limite anuale pentru doza absorbită, în timp ce efectele stohastice sunt limitate prin stabilirea unor valori ale dozei care, în ICRP-60, definesc linia de graniţă dintre acceptabil şi neacceptabil. Prin aceasta se elimină posibilitatea desfăşurării de activităţi nechibzuite în prezenţa radiaţiilor.

În acelaşi timp, principala preocupare pe linie de radioprotecţie este de a scădea, în mod normal, aceste valori limitative, stabilite atât pentru personalul expus profesional (care lucrează în mediu cu radiaţii), cât şi pentru restul populaţiei.

Există două tipuri de iradieri:

- *iradierea externă*, definită ca fiind procesul de interacţiune cu organismul uman a radiaţiilor provenite de la sursele situate în exteriorul acestuia.
- *iradierea internă*, definită ca fiind procesul de interacţiune cu

organismul uman a radiațiilor provenite de la surse situate în interiorul acestuia.

Radiațiile ajunse în organism produc ionizarea directă sau indirectă a țesuturilor, cu efecte nocive, decelabile prin modificări fizice sau funcționale ale diferitelor organe.

Cele mai importante efecte se datorează interacțiunii cu nucleele de hidrogen (60% din greutatea corpului uman este apă) şi cele de azot din amine sau aminoacizi. De cele mai multe ori se ajunge la distrugerea celulelor "agresate", inducându-se modificări chimice substanțiale (efecte somatice). Severitatea efectelor somatice depinde, pe de o parte, de natura şi intensitatea iradierii, iar pe de altă parte, de organul sau țesutul în care se instalează. Un rol important, însă, îl joacă puterea de regenerare a celulelor afectate. Cu cât procesul de regenerare este mai accelerat, cu atât este mai redus efectul somatic.

Efectele biologice ale radiațiilor apar cu întârziere, de la câteva zile până la câțiva ani sau mai mult. Dacă modificările produse în timpul iradierii au loc la nivelul celulelor ce se transmit genetic, atunci vor exista efecte şi la urmaşi (efecte genetice).

Dacă în cazul radiațiilor externe nivelul de radiații poate fi uşor măsurat şi expunerea poate fi oprită oricând, riscul prezentat de sursele interne impune măsuri de precauție deosebite din următoarele cinci motive:

- În cazul iradierii externe numai o parte din radiațiile emise de surse sunt îndreptate asupra corpului. Dacă aceste surse pătrund în corp, toate radiațiile emise de ele interacționează cu organismul.
- Proprietățile chimice ale anumitor radionuclizi îi determină să se concentreze în anumite organe sau țesuturi. Aceasta înseamnă că toată energia radiațiilor α şi β şi o parte din energia radiațiilor γ este absorbită în aceste țesuturi, ele primind o doză de radiații mult mai mare decât restul corpului.

Aceste două motive explică de ce debitul dozei produs de sursele din interiorul corpului este mult mai mare decât debitul produs de aceleaşi surse aflate în exterior.

- Unii radionuclizi sunt eliminați rapid din corp, iar alții pot rămâne pentru câțiva ani şi, în multe cazuri, sunt greu de eliminat.
- Sursele interne iradiază corpul 24 ore pe zi până când vor fi eliminate.

- Odată pătrunse în corp, este dificil să se estimeze doza emisă de aceste surse radioactive.

Radionuclizii pot pătrunde în corp prin trei căi: inhalare, ingerare şi absorbție prin piele sau plăgi.

Cea mai obişnuită cale de pătrundere în corp este inhalarea. Comportarea radionuclizilor inhalați în plămân depinde de faptul dacă sunt sau nu solubili în lichidele pulmonare.

În cazul radionuclizilor solubili, aceştia vor intra în sistemul circulator şi se vor depozita în diferite organe. Eliminarea lor se face, mai ales, prin urină.

Pentru radionuclizii insolubili, plămânul este, de obicei, organul de depunere pentru că el îi reține o perioadă lungă de timp. Deşi prin urină se elimină o fracțiune mică de radionuclizi, se poate pune bază, totuşi, pe analiza urinei în acest caz.

Un mare procent de radionuclizi ce intră în corp se elimină în primele câteva zile. Totuşi o cantitate va fi absorbită de diferite organe în funcție de tipul de radionuclid: Ca, Sr, Ba, Ra se depozitează în oase, iodul în glanda tiroida, stronțiu inhalat în plămâni, stronțiu ingerat în oase.

Iradierea internă se poate datora (şi) inhalării de particule radioactive ce pot fi produşi de fisiune sau produşi de activare. Există două categorii de astfel de particule:

- *particule cu viață scurtă*, ce au timpul de înjumătățire mai mic decât 1 h,
- *particule cu viață lungă*, având timpul de înjumătățire de câteva zile sau mai mult.

Particulele cu viață scurtă provin din dezintegrarea derivaților formați prin dezintegrarea gazelor nobile ca produşi de fisiune.

Particulele cu viață lungă rezultă din produşii de activare şi produşii de fisiune scăpați din combustibil.

Principalele particule cu viață lungă sunt considerați radionuclizii din Tabelul 2.

Aceşti radionuclizi sunt emițători β şi γ, exceptând ^{90}Sr şi ^{14}C ce emit numai particule β.

Radionuclizii cu viață lungă se clasifică în radionuclizi *transportabili* şi *netransportabili*.

Radionuclizii transportabili sunt relativ solubili în fluidul din plămâni şi sunt transferați repede în circuitul sanguin. De aici, ei ajung la diferite țesuturi unde sunt depozitați.

Ca radionuclizi transportabili putem enumera:

^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{131}I, ^{65}Zn, ^{90}Sr, ^{89}Sr, ^{14}C.

Radionuclizii netransportabili pot rămâne în plămâni având un timp de înjumătățire biologic de aproximativ 1 an. Ei se pot elimina prin tuse.

Tabel 2 - PRINCIPALII RADIONUCLIZI CU VIAȚA LUNGĂ

Radionuclid (emițător)	$T_{1/2}$	Localizare
^{144}Ce (β, γ)	284 zile	oase, ficat
^{141}Ce (β, γ)	32,5 zile	oase, ficat
^{140}Ba (β, γ)	12,8 zile	oase
^{140}La (β, γ)	40,2 ore	TGI
^{137}Cs (β, γ)	30 ani	ficat, splină mușchi
^{134}Cs (β, γ)	2,07 ani	întreg corpul
^{131}I (β, γ)	8,06 zile	tiroidă
^{106}Ru (β, γ)	366 zile	TGI
^{103}Ru (β, γ)	40 zile	TGI
^{95}Zr (β, γ)	65 zile	întreg corpul
^{95}Nb (β, γ)	35 zile	întreg corpul
^{90}Sr (β)	28,4 ani	oase
^{89}Sr (β, γ)	51 zile	oase
^{65}Zn (β, γ)	245 zile	întreg corpul
^{60}Co (β, γ)	5,3 ani	întreg corpul
^{59}Fe (β, γ)	45 zile	splină, TGI
^{54}Mn (β, γ)	291 zile	ficat, TGI
^{51}Cr (β, γ)	27,8 zile	întreg corpul
^{14}C (β)	5730 ani	țesut adipos

TGI = tract gastro-intestinal.

CONCLUZII
pentru cei care au avut răbdare să citească toată cartea

În „alb şi negru" (mai degrabă, nuanțe de gri) ...

Fisiunea uraniului este inițiată de un neutron, se eliberează energie şi se produc alți câțiva neutroni suplimentari. În anumite condiții se poate obține o reacție de fisiune în lanț care să conducă fie către o explozie, fie către generarea controlată de căldură.

Pe la mijlocul secolului al XX-lea, aceste procese au fost studiate de numeroşi cercetători, unii dintre ei fiind interesați în obținerea de arme, alții de folosirea energiei în scopuri comerciale; toate acestea în ciuda prețurilor mari pe care activitățile lor le impuneau economiei, sănătății umane sau mediului înconjurător. Unele poveşti din acest domeniu sunt de-a dreptul absurde.

Primele arme nucleare au fost construite în timpul celui de al doilea război mondial, cu cei mai deştepți fizicieni ce au putut fi găsiți în acel moment în Statele Unite. Aceştia au avut la îndemână totul, incluzând cele mai complexe modele fizice, fabrici şi organizații de dimensiuni incredibile.

A existat, însă, o singură problemă: nu aveau uraniu de calitatea cerută. Aşa încât întinsele (geografic vorbind) State Unite au trebuit să caute în lumea largă uraniu de calitate şi să-l cumpere. Şi l-au găsit în, pe atunci, colonia belgiană Congo (mai târziu Republica Democrată Congo şi, în zilele noastre, Zair), din centrul Africii.

Pe scurt, fără ajutorul Belgiei, care a vândut Statelor Unite uraniul congolez, nu am fi avut nici bomba nucleară (atomică), nici cel de al doilea război mondial nu s-ar fi terminat aşa de repede şi nici nu ar fi apărut statele superputeri.

Congo a plătit prețul importantului său statut: a fost condus de un lung lanț de dictatori, până în zilele noastre.

Dar cel mai mare preț a fost plătit de țările care au încercat (cu atât mai mult cele care au şi reuşit) să fabrice arme nucleare. Unele au

falimentat, altele au rămas subdezvoltate, în timp ce cele mai multe au acumulat uriaşe datorii financiare. Fără nici o excepție.

Prețul armelor nucleare se poate regăsi şi în acele regiuni ale planetei care au devenit nelocuibile: numeroase insule, deşerturi şi medii marine.
Ar putea fi şi mai rău ?

Când Edward Teller a făcut primele sale calcule în legătură cu bomba cu hidrogen (termonucleară), a prezis că întreaga atmosferă va fi incendiată. Hans Bethe, laureat al premiului Nobel, i-a corectat greşeala şi a arătat că nimic de felul acesta nu se va întâmpla.

Cu toate acestea, militarii au preferat să explodeze bomba cu hidrogen în atolul Bikini, cel mai îndepărtat loc (față de Statele Unite) pe care l-au putu găsi. Azi este periculos chiar şi numai să zbori peste această insulă.

S-a notat atunci că: testele cu explozii nucleare cresc radioactivitatea ambientală din atmosfera întregului glob; în ce priveşte elementele radioactive, ^{3}H este absorbit de corpul uman odată cu apa de băut, ^{14}C şi ^{90}Sr prin alimente, iar ^{137}Cs pe ambele căi.

Fapt pentru care, în loc să le stopeze, toate țările au fost de acord să realizeze următoarele lor teste nucleare numai în subteran.

Dar şi reactoarele nucleare paşnice pot fi periculoase. Cauza a fost descoperită în 1934 de Frédéric Joliot şi soția sa Irène, fiica lui Pierre şi Marie Curie: *radioactivitatea artificială*.

Cei doi savanți au descoperit că materialele iradiate cu radiații alfa devin, la rândul lor, radioactive. Mai precis, ei au găsit că radiațiile alfa au transformat aluminiul în fosfor radioactiv:

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{4}_{15}P$$

În fapt, aproape toate materialele devin radioactive când sunt iradiate cu particule alfa, neutroni sau radiații gamma. Prin urmare, radioactivitatea în sine nu poate fi „închisă” decât cu foarte mare dificultate. După un timp ce depinde de material şi radiație, „cutia” care conține materialul radioactiv devine ea însăşi radioactivă.

Periculozitatea radioactivității naturale şi artificiale reprezintă rațiunea costurilor înalte ale reactoarelor nucleare. După aproape treizeci de ani ele ar trebui demolate. Resturile radioactive trebuie stocate în locuri speciale alese, inaccesibile dar amenajate. În acelaşi timp, sănătatea lucrătorilor nu ar trebui să fie pusă în pericol, fapt pentru care firmele ce se ocupă cu manipularea acestor deşeuri radioactive îşi oferă serviciile la prețuri ridicate. Până la urmă, toate aceste firme operează într-o arie nu

departe de limita activității criminale şi, cum radioactivitatea nu poate fi detectată de simțurile omului, mulți angajați ajung să fie iradiați.

.... Şi „parțial color”

Conform Principiului Teoriei Relativității Restrânse (Speciale) a lui Einstein, viteza luminii în vid este o limită superioară. În alte medii, „pline”, deplasarea, cu viteze mai mari decât cea a luminii în respectivele medii, este posibilă.

Dacă o particulă încărcată electric se deplasează în apă mai repede decât viteza lumii în apă, atunci ea emite aşa-numita radiație Čerenkov. Ea corespunde „undei în V” create de o barcă cu motor pe apa unui lac, sau „undei de şoc” din jurul unui avion ce zboară cu viteză mai mare decât cea a sunetului în aer.

Radiația Čerenkov, sau radiația de frânare (bremsstrahlung, în limba germană) cum mai este ea numită, poate fi admirată în reactoarele nucleare sub forma unei luminescențe albastre a apei din piscină.

Dacă nu ştiați …

- Nu toate razele γ sunt cauzate de radioactivitate. În anul 2000, un grup de italieni a descoperit că furtunile emit şi ele radiații γ de până la 10 MeV. Mecanismul este în curs de investigare.

- Reacțiile în lanț sunt foarte comune în natură. Focul este o reacție chimică în lanț, aşa cum sunt şi exploziile de artificii. În ambele cazuri, materialul trebuie să fie încălzit până la ardere, iar această căldură provine de la o regiune a sa care arde deja.

- Până şi plumbul este foarte slab radioactiv deoarece conține izotopul ^{210}Pb, un emițător beta. Pentru experimente sensibile, cum ar fi cele privind evidențierea particulei neutrino, este nevoie de ecrane performante împotriva radioactivității. Cel mai bun material este plumbul, dar, s-a văzut, şi acesta este slab radioactiv. Deoarece izotopul ^{210}Pb are timpul de înjumătățire de 22 de ani, o cale de urmat ar fi utilizarea unui plumb „foarte bătrân”. În experimentul de precizie privind neutrino, de la Gran

Sasso – Italia, cercetătorii folosesc numai plumb extras încă de pe vremea Imperiului Roman.

- Tehnica de datare radiometrică a avut un impact profund în astronomie, geologie, evoluție biologică, arheologie şi istorie. Timpul de înjumătățire poate fi măsurat în mod uzual cu o precizie de 1 ÷ 2 procente şi s-a dovedit teoretic şi practic că aceasta nu se schimbă de-a lungul timpului geologic. Ca urmare, metodele de datare radiometrică sunt surprinzător de precise.

- Şi vechimea vinului se măsoară prin metode radiometrice, izotopii monitorizați fiind: ^{14}C ($T_{1/2}$ = 5730 ani; se dezintegrează către ^{14}N), ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30 ani), ^{210}Pb ($T_{1/2}$ = 22 ani) şi ^{3}H ($T_{1/2}$ = 12,3 ani).

- Timpul de înjumătățire poate fi modificat de cauze externe. Captura electronului de către beriliu-7 este un astfel de rar exemplu, timpul de înjumătățire putând fi modificat cu până la 1,5%. Şi tot pentru acest izotop, valoarea $T_{1/2}$ poate fi modificată cu încă un procent dacă ^{7}Be este supus la presiuni de ordinul 27 GPa. Aceste efecte sunt neglijabile pentru radioelementele grele.

Pesimistul este un optimist bine informat

După potop, Dumnezeu i-a promis lui Noe că nu va mai distruge Viața pe Pământ.

Nu-i nimic !

Nu-i bai !

No problem !

Omul are acum la îndemână tot ce-i trebuie pentru a face el singur acest lucru !

BIBLIOGRAFIE

1. *** *DEX SE EN2 – Dicţionar explicativ pentru ştiinţele exacte; energie nucleară,* Editura Academiei Române, Bucureşti, 2002

2. *** *Fabrication of Water Reactor and Fuel Elements* ; Proceedings-Praga, 1978

3. *** *Reliability Problems of Reactor Pressure Components* ; Proceedings-IAEA, Viena, 1978

4. *** *CANDU Nuclear Power System* ; AECL, January, 1981

5. *** *Primary Heat Transport System* ; Course Hanbout, 1993

6. *** *COG Report* , AECL, 1995

7. *** *Nuclear Power Reactors in the World*, IAEA Viena, April 2006

8. *** Surse Wikipedia.org

9. Brătianu, C. ş.a. *Strategii şi filiere energetice nucleare*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1990

10. Burnham, J. U. *Radiation Protection*, Point-Lepreau Generating Station, 1992

11. Hughes, D. J. *Problems in Nuclear Engineering*, Pergamon Press, New York, 1957

12. Murray, I. R. *Nuclear Energy*, Pergamon Press, New York, 1976

13. Oncescu, M. Al. *Detectarea radiațiilor nucleare*, ICFIZ, Bucureşti-Măgurele, 1978

14. Oncescu, M. Al. *Îndreptar pentru radioprotecție*, ICFIZ, Bucureşti-Măgurele, 1981

15. Ursu, I. *Energia atomică*, Editura Ştiințifică, Bucureşti, 1973

16. Ursu, I. *Fizica şi tehnologia materialelor nucleare*, Editura Academiei RSR, Bucureşti, 1982

17. Wang, L. L. *Elements of Nuclear Reactor Engineering*, Gordon and Breach Scientific Publication, London, 1974

ANEXE

- PERSONALITĂȚI

BOHR,
Niels (Henrik David)

(*07.10.1885 – 18.11.1962*)

BOTHE,
Walther Wilhelm Georg

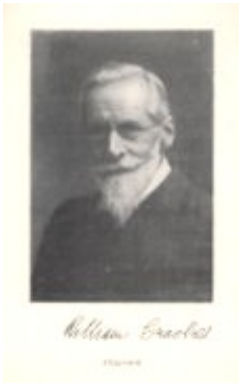
(*08.01.1891 – 08.02.1597*)

CHADWICK,
Sir James

(*20.10.1891 – 24.07.1974*)

CROOKES,
Sir William

(*17.06.1831 – 04.04.1919*)



CURIE,
Irène Joliot-

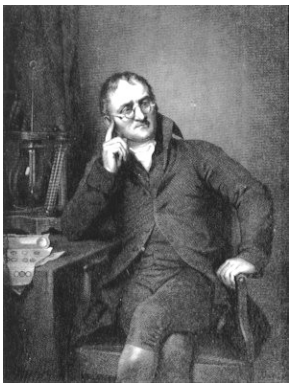
(*12.09.1897 – 17.03.1956*)

CURIE,
Jean Frédéric Joliot-

(*19.03.199 – 14.08.1958*)

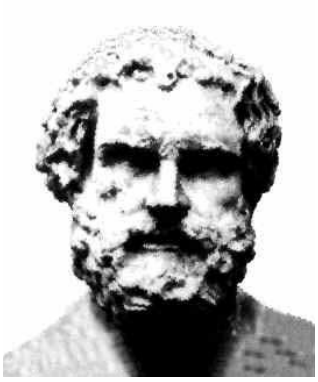
DALTON,
John

(*06.09.1766 – 27.07.1844*)



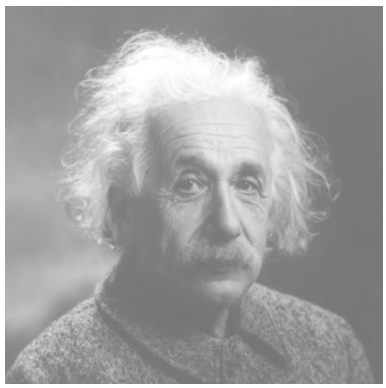
DEMOCRIT,
din Abdrea

(*ca. 460 î.Hr. – ca. 370 î. Hr.)*



EINSTEIN,
Albert

(*14.03.1879 – 18.04.1955*)



FERMI,
Enrico

(*29.09.1901 – 28.11.1954*)

FRISCH,
Otto Robert

(*01.10.1904 – 22.09.1979*)

GEIGER,
Johannes (Hans) Wilhelm

(*30.09.1882 – 27.09.1945*)

HAHN,
Otto

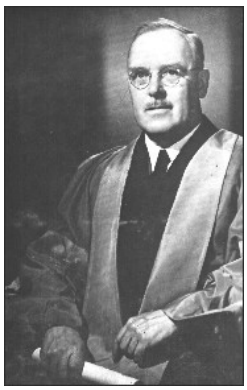
(*08.03.1879 – 28.07.1968*)

HEISENBERG,
Werner

(*05.12.1901 – 01.02.1976*)

MARSDEN,
Sir Ernest

(*1889 – 1970*)



MEITNER,
Lise

(*17.11.1878 – 27.10.1968*)

PAULI,
Wolfgang

(*25.04.1900 – 15.12.1958*)

PEGRAM,
George Braxton

(-)

RUTHERFORD,
Ernest

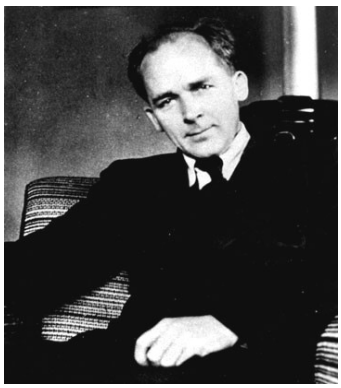
(*30.08.1871 – 19.10.1937*)

STONEY,
Johnstone George

(*15.02.1826 – 05.07.1911*)

STRASSMAN,
Fritz (Friedrich Wilhelm)

(*22.02.1902 – 22.04.1980*)



SZILÁRD,
Leo

(*11.02.1898 – 30.05.1964*)

THOMSON,
Joseph John

(*18.12.1856 – 30.08.1940*)

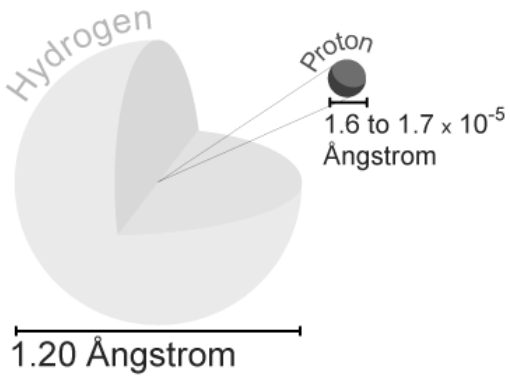
WIECHERT,
Johann Emil

(*23.12.1861 – 19.03.1928*)

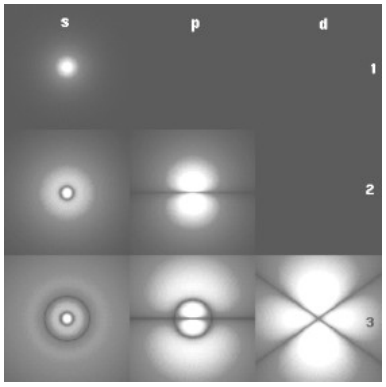
YUKAWA,
Hideki

(*23.01.1907 – 08.09.1981*)

- ATOMUL

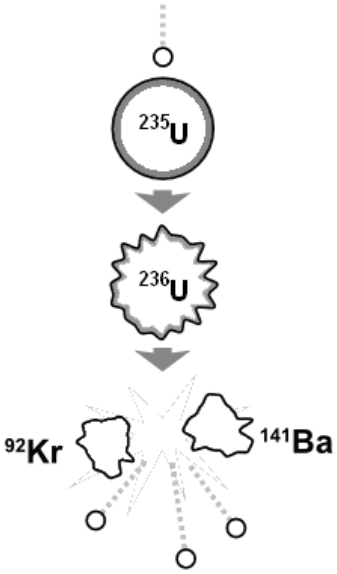


Atomul de hidrogen

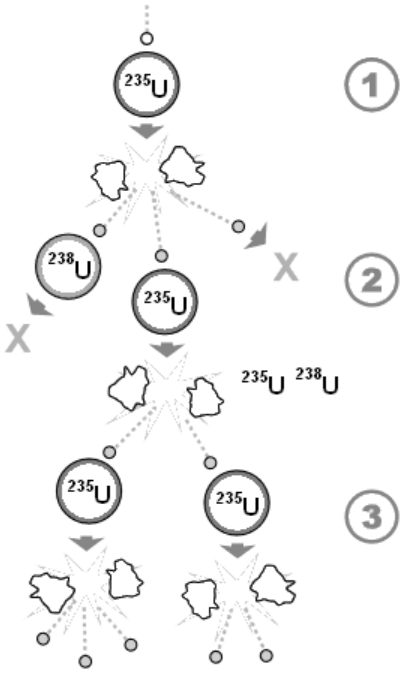


Electronii în atomul de hidrogen
(*orbitalii sunt secțiunile transversale, iar zona luminată reprezintă densitatea de probabilitate*)

- FISIUNEA NUCLEARĂ



Fisiunea nucleară
a nuclidului ^{235}U

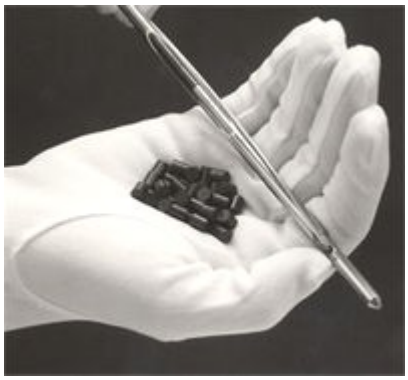


Reacția de fisiune în lanț
pentru nuclidul ^{235}U

- URANIUL

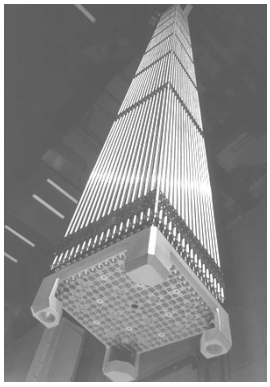
Minereu de uraniu

Pudră pentru “turta galbenă”

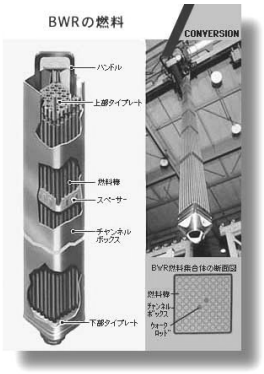


Combustibil nuclear solid:
compact, inert, insolubil
(pastile şi element)

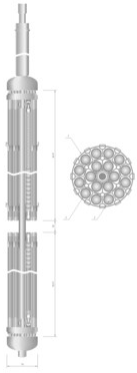
- COMBUSTIBILI NUCLEARI



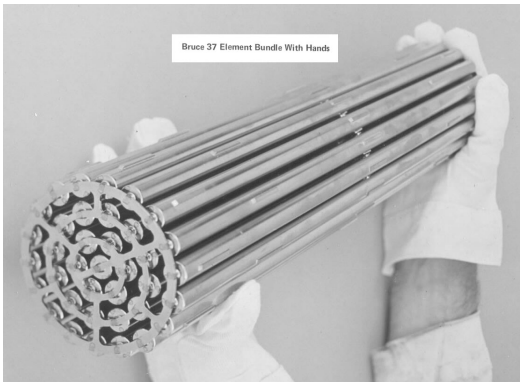
PWR



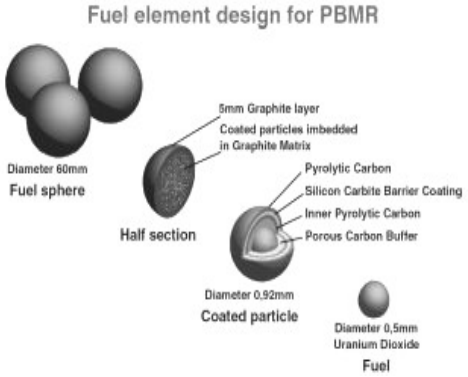
BWR



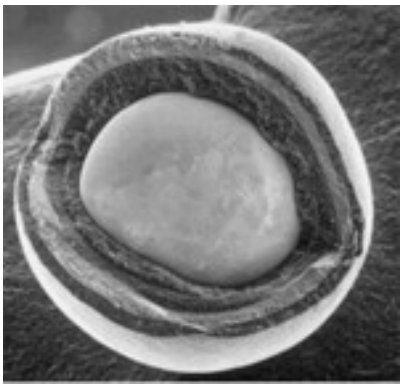
RBMK



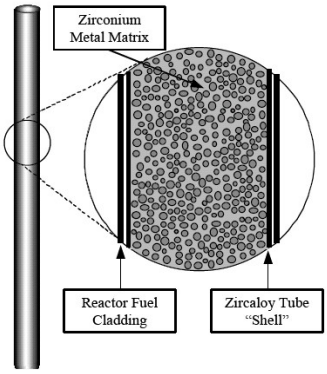
CANDU



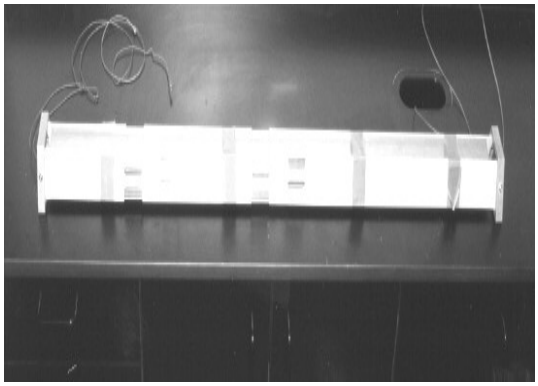
PBMR



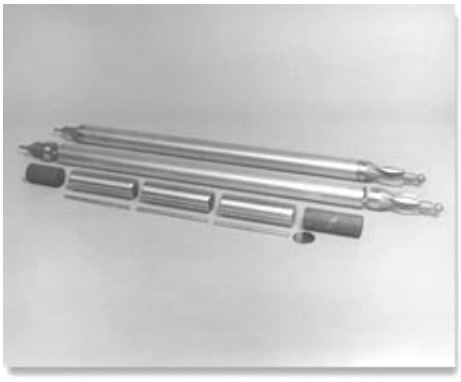
TRISO



CERMET

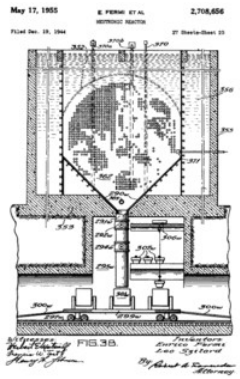


ATR (plate)



TRIGA

- REACTOARE NUCLEARE



Un desen din
U.S. Patent 2,708,656
acordat lui Fermi şi Szilárd
pentru
The Neutronic Reactor

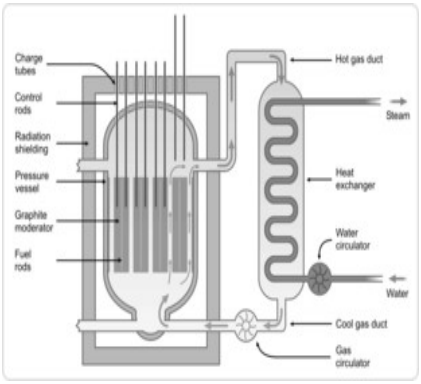


Diagrama
Magnox

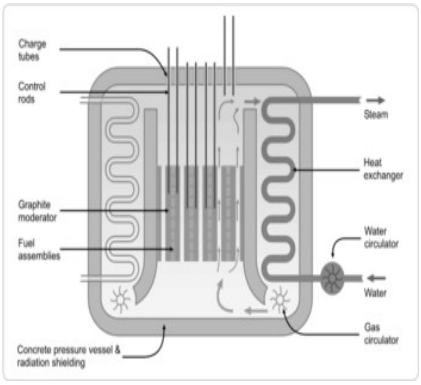


Diagrama
AGR

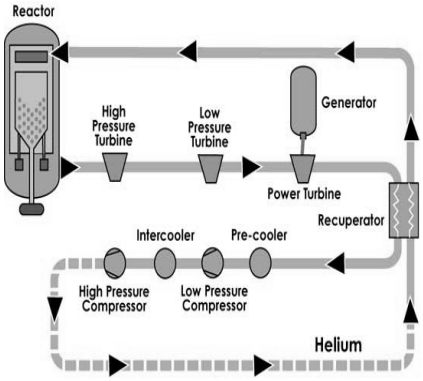


Diagrama HTGR

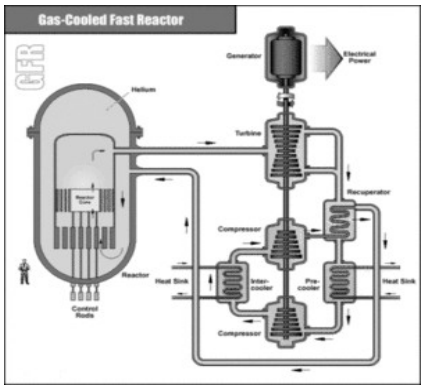
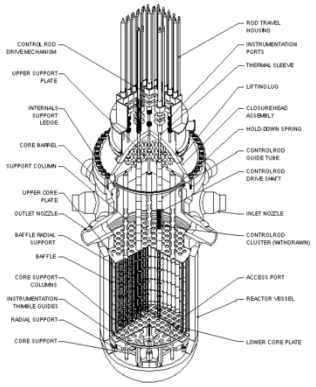


Diagrama GFR



Vasul PWR

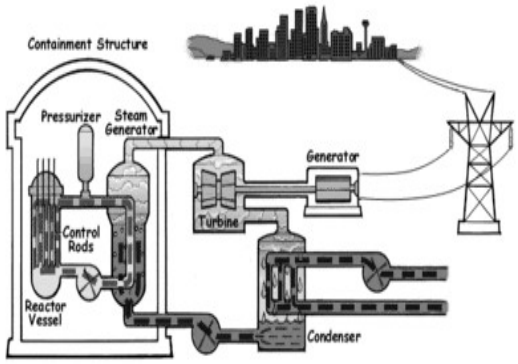
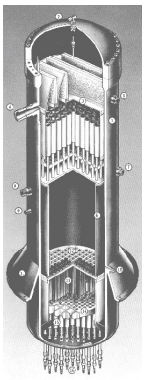


Diagrama PWR



Vasul SBWR

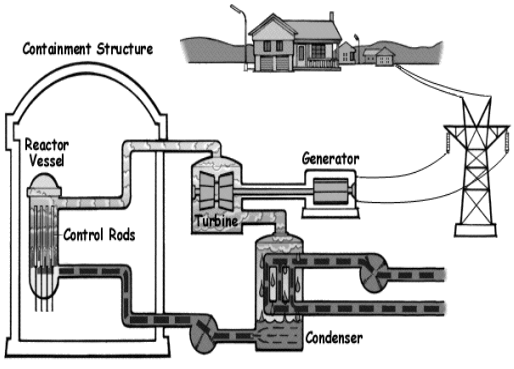


Diagrama BWR

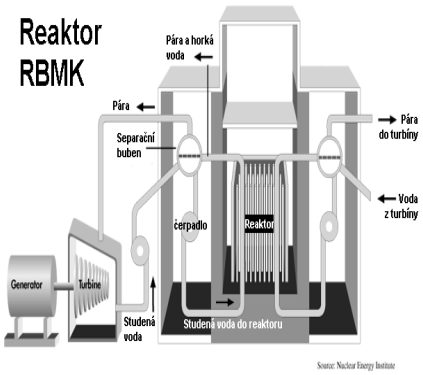
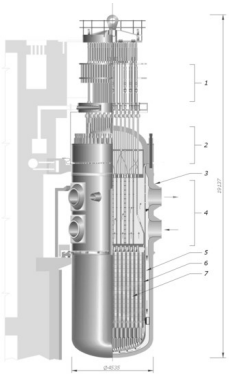


Diagrama
RBMK



Vasul
VVER

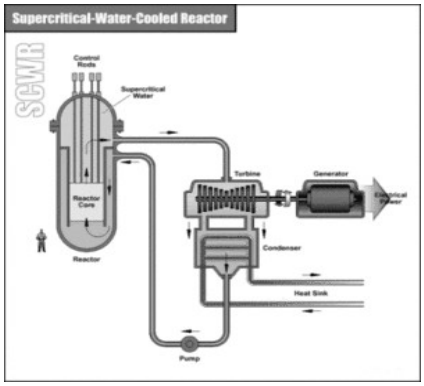


Diagrama
SCWR

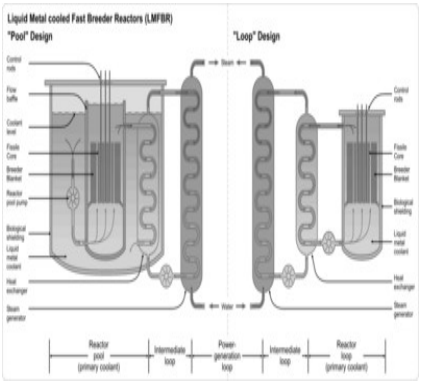


Diagrama LMFBR

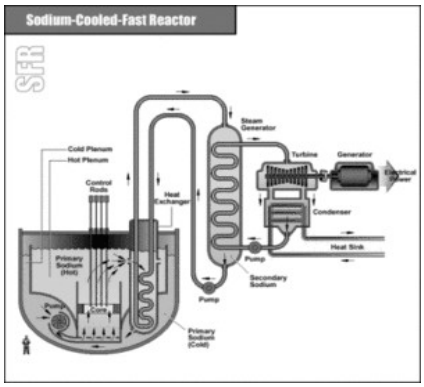


Diagrama SFR

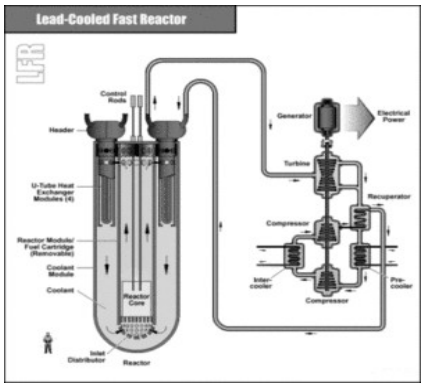


Diagrama LFR

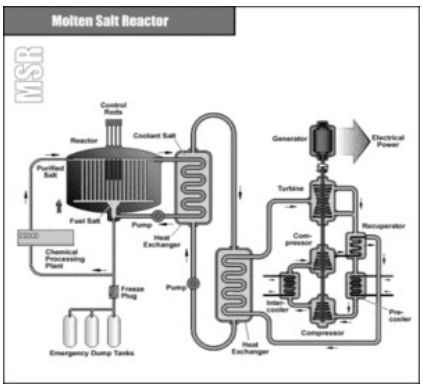


Diagrama
MSR

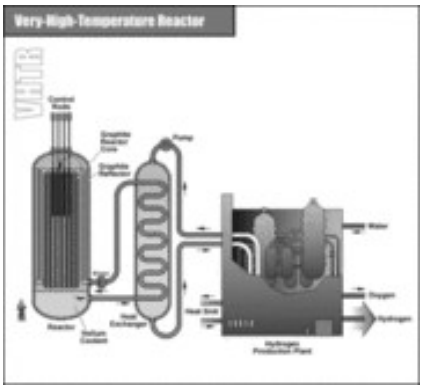
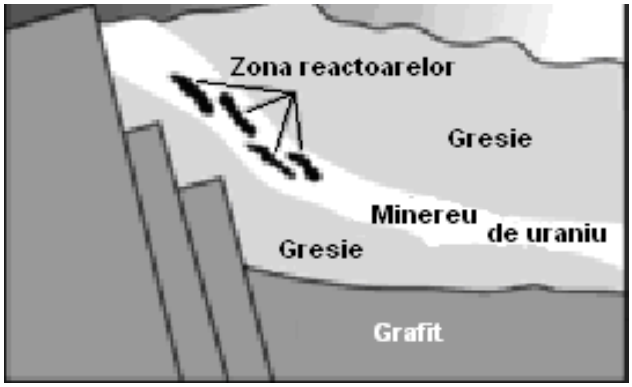


Diagrama
VHTR

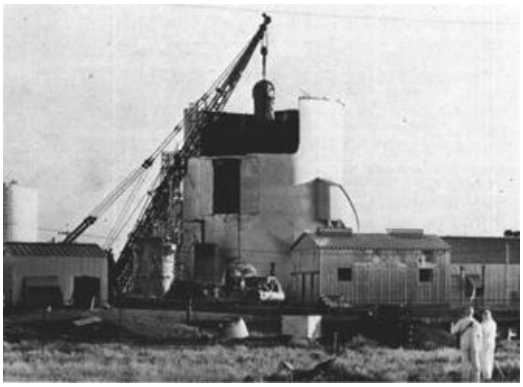


Reactoarele fosile
de la Oklo

- ACCIDENTUL NUCLEAR

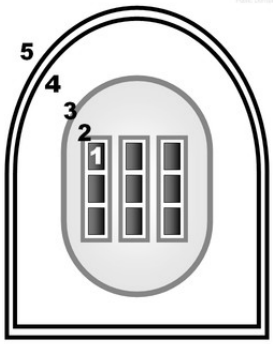
Three Mile Island
(reactoarele din stânga sunt oprite)

Cernobîl



Îndepărtarea reactorului SL-1 după accidentul de la National Reactor Testing Station

- SECURITATE NUCLEARĂ



Apărarea în adâncime:

1 – oxidul de uraniu însuşi
2 – teaca etanşă a elementului combustibil
3 – vasul de presiune al reactorului
4 – clădirea container, etanşă, a reactorului
5 – clădirea reactorului

- BOMBA ATOMICĂ

"Little Boy"

Ciuperca atomică

Hiroshima, după ...

Rezervele de arme nucleare în Statele Unite şi URSS / Rusia

- REACTOARE NUCLEARE ÎN LUME

Prezentăm în continuare o listă conținând (aproape) toate reactoarele nucleare din țările lumii, aflate sau nu în funcțiune, mai puțin cele utilizate la propulsia marină.

AFRICA DE SUD

Centrale Nuclearo-Electrice

Koeberg, lângă Cape Town:

- *Koeberg-1: putere 920 MWe*
- *Koeberg-2: putere 920 MWe*

Reactoare de cercetare

Pelindaba Nuclear Research Center, lângă Pretoria:

- *Safari-1: reactor cu piscină de 20 MWe*
- *Safari-2: (dezafectat în 1970)*

ALGERIA

Es Salam

Nur

ANTARCTICA

- *McMurdo Station, PM-3A NNPU "Nukey Poo": reactor de putere al Flotei marine a Statelor Unite (operațional din 1962, oprit în 1972, demontat complet în 1979)*

ARGENTINA

Centrale Nuclearo-Electrice:

- *Atucha-1: reactor PHWR, putere 335 MWe*
- *Atucha-2: în construcție; reactor PHWR, putere 692 MWe*
- *Embalse: o singură unitate CANDU, putere 600 MWe*

Reactoare de cercetare:

Toate reactoarele sunt utilizate şi operate de National Atomic Energy Commission, cu excepțiile notate mai jos:

- *RA-0: clădit în 1964, putere 0,01 kWt, cu vas de presiune, utilizat şi operat de Universidad National de Córdoba*
- *RA-1 Enrico Fermi: construit în 1957, putere 40 kWt, cu vas de presiune*
- *RA-2: construit în 1965, putere 0,03 kWt, cu concentrație critică, oprit pe 01/09/1983*
- *RA-3: construit în 1963, putere 5.000 kWt*
- *RA-4 (fost SUR-100): construit în 1971, cu piscină, utilizat şi operat de Universidad Nacional de Rosario.*

- *RA-6: construit în 1978, putere 500 kWt, cu piscină*
- *RA-8: construit 1986, 0.01 kWt, cu concentrație critică, oprit*

ARMENIA

Metsamor

- *Armenia-1 (oprit)*
- *Armenia-2*

AUSTRALIA

- *HIFAR (High Flux Australian Reactor; 10 MW), Lucas Heights, New South Wales*
- *MOATA (100 kW) oprit permanent*
- *OPAL de 20 MWe, în curs de punere în funcțiune, Lucas Heights, New South Wales*

AUSTRIA

- *Austrian Research Centers de la Seibersdorf: reactorul de cercetare ASTRA de 10 kWe, în exploatare pe perioada 1960-1999.*
- *Atomic Institute of the Austrian Universities din Viena: reactorul de cercetare de 250 kWe de tip TRIGA Mark II, în uz din 1962*
- *Zwentendorf (a fost terminat în 1978, dar, în urma unui vot public, nu a fost niciodată încărcat cu combustibil, deci nu a fost niciodată pus în funcțiune)*

BANGLADESH

- *Dhaka: reactor tip TRIGA Mark II, operat de Atomic Energy Research Establishment, instalat în 1986*

BELARUS

- *Sosny, Minsk: reactor de cercetare IRT (oprit în 1988); "Pamir" – reactor de putere mobil (oprit în 1986)*

BELGIA

- *Mol (BR-3): reactor PWR (oprit)*
- *Doel: 2 reactoare PWR de 412 MWe fiecare; 1 reactor PWR de 1.056 MWe; 1 reactor PWR de 1.041 MWe*
- *Tihange: 1 reactor PWR de 870 MWe; 2 reactoare PWR de 930 MWe fiecare*

BRAZILIA

- *Angra Nuclear Power Plant, Angra dos Reis, Rio de Janeiro: 2 unități de tip PWR*
- *Belo Horizonte: reactor tip TRIGA Mark I, operat de Universitatea din Minas Gerais (instalat în 1960)*

BULGARIA

- *Kozloduy: reactoare WWER-440 şi WWER-1000 (construite din 1969)*
- *Sofia: reactor de cercetare IRT (oprit în 1987)*

CANADA

Ontario

Ontario Power Generation Pickering A

- *UNIT 1: reactor de 515 MWe tip CANDU*
- *UNIT 2: reactor de 515 MWe tip CANDU (oprit)*
- *UNIT 3: reactor de 515 MWe tip CANDU (oprit)*
- *UNIT 4: reactor de 515 MWe tip CANDU*

Ontario Power Generation Pickering B

- *UNIT 5: reactor de 516 MWe tip CANDU*
- *UNIT 6: reactor de 516 MWe tip CANDU*
- *UNIT 7: reactor de 516 MWe tip CANDU*
- *UNIT 8: reactor de 516 MWe tip CANDU*

Ontario Power Generation Darlington

- *UNIT 1: reactor de 881 MWe tip CANDU*
- *UNIT 2: reactor de 881 MWe tip CANDU*
- *UNIT 3: reactor de 881 MWe tip CANDU*
- *UNIT 4: reactor de 881 MWe tip CANDU*

Bruce Power Bruce A

- *UNIT 1: reactor de 750 MWe tip CANDU (în curs de îmbunătăţire; va fi pus în funcţiune în 2009)*
- *UNIT 2: reactor de 750 MWe tip CANDU (în curs de îmbunătăţire; va fi pus în funcţiune în 2010)*
- *UNIT 3: reactor de 750 MWe tip CANDU*
- *UNIT 4: reactor de 750 MWe tip CANDU*

Bruce Power Bruce B

- *UNIT 1: reactor de 785 MWe tip CANDU*
- *UNIT 2: reactor de 820 MWe tip CANDU*
- *UNIT 3: reactor de 785 MWe tip CANDU*
- *UNIT 4: reactor de 785 MWe tip CANDU*
- *Nuclear Power Demonstrator (Rolphton, Ontario): un prototip scos din funcţiune*
- *Douglas Point (Tiverton, Ontario): un prototip scos din funcţiune*

Quebec

Hydro-Quebec Gentilly Nuclear Generating Station

- *UNIT 1: reactor de 250 MWe (oprit în 1977)*

- *UNIT 2: reactor de 635 MWe CANDU-6*

New Brunswick

NB Power Point Lepreau Nuclear Generating Station

- *UNIT 1: reactor de 635 MWe tip CANDU-6*

Reactoare de cercetare

Chalk River Laboratories

- *MMIR-1 – MAPLE: reactor de producţie izotopi de clasă medicală*
- *MMIR-2 – MAPLE: reactor de producţie izotopi de clasă medicală*
- *NRU – 135 MWth*
- *NRX reactor – (1947-???)*
- *SLOWPOKE-1: prototip, mutat la Universitatea din Toronto, upgradat mai târziu ca SLOWPOKE-2*
- *PTR: reactor de testare cu piscină (oprit în 1990)*
- *ZED-2: reactor „zero-energie”*
- *ZEEP: primul reactor nuclear din Canada şi primul din afara Statelor Unite*

Whiteshell Laboratories

- *WR-1: reactor răcit cu agent organic; de clasă CANDU*
- *SDR: reactor de demonstraţie din clasa SLOWPOKE-3 (oprit în 1989)*
- *Dalhousie University, Halifax, Nova Scoţia: reactor de clasă SLOWPOKE-2*
- *Kanata: reactor de clasă SLOWPOKE-2 (oprit în 1989)*
- *Tunney's Pasture - Ottawa, Ontario: reactor prototip de clasă SLOWPOKE-2 (oprit în 1984)*
- *École Polytechnique de Montréal, Montréal: reactor de clasă SLOWPOKE-2*
- *McMaster Nuclear Reactor: reactor de clasă MTR de 5 MWth*
- *Royal Military College Kingston, Ontario: reactor de clasă SLOWPOKE-2*
- *Saskatchewan Research Council, Saskatoon: reactor de clasă SLOWPOKE-2*
- *Universitatea din Alberta, Edmonton: reactor de clasă SLOWPOKE-2*
- *Universitatea din Toronto: reactor de clasă SLOWPOKE-2 (oprit)*

CHINA

- *Daya Bay 1 (Guangdong 1), PWR 944/984 MWe, din August 1993*
- *Daya Bay 2 (Guangdong 2), PWR 944/984 MWe, din Februarie 1994*
- *Ling'ao 1 (Lingao A), PWR 938/990 MWe, din Februarie 2002*
- *Ling'ao 2 (Lingao B), PWR 938/990 MWe, din Decembrie 2002*
- *Qinshan 1 (fost Qinshan), PWR 279/300 MWe, din Decembrie 1991*
- *Qinshan 2-A (fost Qinshan 2, aparţinând Qinshan 2-A), PWR 610/642 MWe, din Februarie 2002*
- *Qinshan 2-B (fost Qinshan 3), PWR 610/642 MWe, din Martie 2004*
- *Qinshan 3-A, PHWR 665/728 MWe, din Aprilie 2003*
- *Qinshan 3-B, PHWR 665/728 MWe, din Iulie 2003*
- *Tianwan-1 (Lianyungang), VVER 1.000/1.060 MWe, din Mai 2006*
- *Tianwan-2 (Lianyungang), VVER 1.000/1.060 MWe, în curs de construcţie*
- *Qinshan-4A (în curs de construcţie)*

COLUMBIA

- *Bogotá: reactor TRIGA operat de Institutul de Ştiinţe Nucleare, instalat în 1997*

CONGO

- *TRICO I: rector TRIGA operat de Universitatea din Kinshasa (oprit din 1970)*
- *TRICO II: reactor TRIGA, operat de Universitatea din Kinshasa*

COREA DE NORD

Centrale Nuclearo-Electrice

Yongbyon

- *Yongbyon 2: reactor Magnox de 50 MWe (construcţia a fost suspendată în 1994)*

Taechon, la 20 km de Yongbyon

- *Taechon 1: reactor de 200 MWe (construcţia a fost suspendată în 1994)*

Kumho, la 30 km nord de Sinpo

- *Kumho 1: reactor PWR de 1.000 MWe (construcţia a fost suspendată în 2003)*
- *Kumho 2: reactor PWR de 1.000 MWe (construcţia a fost suspendată în 2003)*

Reactoare de cercetare

Yongbyon

- *IRT-2000: reactor de cercetare de 8 MWt (2MWt 1965-1974, 4MWt 1974-1986) moderat cu apă grea (construit de fosta URSS în 1965)*
- *Yongbyon 1: reactor Magnox de 5 MWe; asigură local energie electrică şi căldură (activ în perioada 1987-1994, reactivat în 2003)*

COREA DE SUD

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Gori1: reactor PWR de 563 MWe*
- *Gori2: reactor PWR de 612 MWe*
- *Gori3: reactor PWR de 903 MWe*
- *Gori4: reactor PWR de 903 MWe*
- *Ulchin1: reactor PWR de 920 MWe*
- *Ulchin2: reactor PWR de 920 MWe*
- *Ulchin3: reactor PWR (KSNP) de 960 MWe*
- *Ulchin4: reactor PWR (KSNP) de 960 MWe*
- *Ulchin5: reactor PWR (KSNP) de 960 MWe*
- *Ulchin6: reactor PWR (KSNP) de 960 MWe*
- *Wolsong1: reactor PHWR de 629 MWe*
- *Wolsong2: reactor PHWR de 650 MWe*
- *Wolsong3: reactor PHWR de 650 MWe*
- *Wolsong4: reactor PHWR de 650 MWe*
- *Yonggwang1: reactor PWR de 900 MWe*
- *Yonggwang2: reactor PWR de 900 MWe*
- *Yonggwang3: reactor PWR (Syst 80) de 950 MWe*
- *Yonggwang4: reactor PWR (Syst 80) de 950 MWe*
- *Yonggwang5: reactor PWR (KSNP) de 950 MWe*
- *Yonggwang6: reactor PWR (KSNP) de950 MWe*

Reactoare de cercetare

- *Reactorul de cercetare Aerojet General Nucleonics Model 201*
- *HANARO: reactor din clasa MAPLE*
- *Reactorul de cercetare TRIGA General Atomics Mark II*

CUBA

- *Juragua, Cienfuegos: construcția a două reactoare de tip VVER de 417 MWe a fost suspendată din 1992 din cauza colapsului Uniunii Sovietice*

CEHOSLOVACIA

- *Dukovany: 4 reactoare tip VVER, 440 MWe fiecare*
- *Temelín: 2 reactoare tip VVER, 1.000 MWe fiecare*
- *Řež: 2 reactoare de cercetare de tip LVR-15 şi LR-0*
- *Praga: reactor de cercetare VR-1 la Universitatea Tehnică Cehoslovacă*

DANEMARCA

- *Risø: DR-3 reactor de clasă DIDO (oprit)*

EGIPT

Centrul de Cercetări Nucleare Inshas

- *ETTR-1: reactor LWR de 2 MWe (construit de USSR, 1958)*
- *ETTR-2: reactor de 22 MWe (construit de Argentina, 1998)*

ELVEȚIA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Beznau: 2 reactoare PWR*
- *Goesgen: 1 reactor PWR*
- *Leibstadt: 1 reactor BWR*
- *Muehleberg: 1 reactor BWR*

Reactoare de cercetare

- *Lucens: 1 reactor GCHWR, (oprit după accidentul din 1969)*
- *Lausanne: reactorul CROCUS de putere nulă, operat de École Polytechnique Fédérale de Lausanne*

ESTONIA

- *Paldiski: 2 reactoare PWR pentru antrenament naval (demontat)*

FILIPINE

- *Quezon City: reactor TRIGA, instalat în 1988 şi operat de Philippine Atomic Energy Commission*
- *Centrala Nuclearo-Electrică Bataan: 620 MWe*

FINLANDA

Loviisa: 2 reactoare

Olkiluoto

- *Olkiluoto-1*
- *Olkiluoto-2*
- *Olkiluoto-3 – un reactor EPR, început în Septembrie 2005*

Reactoare de cercetare:

- *Espoo: reactor TRIGA Mark II, instalat din 1962 la Institutul de Stat pentru Cercetare Ştiinţifică*

FRANŢA

Reactoare operaţionale:

- *Belleville: 2 reactoare de 1.310 MWe fiecare*
- *Bugey: 4 reactoare*
- *Cattenom: 4 reactoare de 1.300 MWe fiecare, lângă graniţele cu Luxembourg şi Germania*
- *Chinon: 4 reactoare*
- *Chooze-B: 2 reactoare de 1.455 MWe fiecare*
- *Civaux: 2 reactoare de 1.455 MWe fiecare*
- *Cruas: 4 reactoare*
- *Dampierre: 4 reactoare de 890 MWe fiecare*
- *Fessenheim: 2 reactoare de 880 MWe fiecare; cele mai vechi reactoare PWR din Franţa aflate încă în stare de operare comercială*
- *Flamanville: 2 reactoare 1.330 MWe fiecare*
- *Golfech: 2 reactoare*
- *Gravelines: 6 reactoare de 910 MWe fiecare*
- *Le Blayais: 4 reactoare*
- *Nogent-sur-Seine: 2 reactoare*
- *Paluel: 4 reactoare de 1.330 MWe fiecare*
- *Penly: 2 reactoare*
- *Phénix: 1 reactor de 233 MWe*
- *Saint Alban: 2 reactoare*
- *Saint Laurent des Eaux: 2 reactoare*
- *Tricastin: 4 reactoare*

Reactoare ce urmează să fie construite/puse în funcţiune:

- *Electricité de France (EDF) planifică construirea primului reactor EPR de 1.639 MWe la Flamanvill*

Reactoare neoperaţionale:

- *Bugey: 1 reactor*
- *Chinon: 3 reactoare*
- *Chooz-A: 1 reactor de 310 MWe; primul reactor PWR din Europa (1967) manageriat de SENA (Société d'énergie nucléaire franco-belge des Ardennes)*
- *Marcoule: 3 reactoare*
- *Monts d'Arrée: 1 reactor cu apă grea de 70 MWe, tip HWR EL-49, singurul de acest tip din Franţa, în Brennilis, Brittany*
- *Saint Laurent des Eaux: 2 reactoare*

- *Superphénix, Creys-Malville: 1 reactor*

Reactoare închise:

- *Le Carnet*
- *Plogoff*
- *Thermos,: un reactor de 50 ÷ 100 MWe pentru încălzire urbană la Grenoble*

Reactoare de cercetare:

- *Institutul Laue-Langevin: în momentul de față deține reactorul cu cea mai intensă sursă de neutroni folosiți în scopuri științifice*
- *Rhapsodie*
- *Zoe: primul reactor francez (1948)*

GERMANIA

- *Biblis cu Biblis-A and Biblis-B*
- *Brokdorf*
- *Brunsbüttel*
- *Lingen (Emsland)*
- *Garching bei München (FRM-II): reactor de cercetare la Technische Universität München*
- *Grafenrheinfeld*
- *Grohnde*
- *Gundremmingen cu Gundremmingen-B şi Grundremmingen-C; unitatea A este „moartă”*
- *Hahn-Meitner Institut: reactor de cercetare (BENSC)*
- *Centrala Nuclearo-Electrică de la ISAR, cu Isar-1 şi Isar-2*
- *Krümmel*
- *Neckarwestheim cu Neckarwestheim-1 şi Neckarwestheim-2*
- *Philippsburg cu Philippsburg-1 şi Philippsburg-2*
- *Unterweser*

Centrale Nuclearo-Electrice oprite dar nu „moarte”:

- *Centralele de cercetări nucleare din Jülich şi Karlsruhe*
- *Centrala din fosta RDF din Greifswald (Greifswald-1 până la Greifswald-4, şi neterminatul reactor Greifswald-5) de tip WWER-440*
- *Gundremmingen-A (oprită în 1977)*
- *Hamm-Uentrop: reactor THTR 300, oprit în 1988*
- *Lingen: oprit în 1977*
- *Mülheim-Kärlich: terminată, operațională scurt timp şi oprită în 1988 datorită potențialelor pericole*
- *Niederaichbach: oprit în 1974*

- *Obrigheim: oprit în Mai 2005*
- *Rheinsberg: oprit în 1990, de tip WWER-70*
- *Stade: oprit în 2003*
- *Würgassen: oprit în 1994*
- *Kalkar: neterminat*
- *Wyhl: centrala nucleară faimoasă care n-a fost clădită niciodată datorită rezistenței de lungă durată a populației şi a apărătorilor mediului înconjurător*

GRECIA

- *GRR-1: reactor de cercetare de 5 MWe la Demokritos National Centre for Scientific Research (Centrul Național Demokriticos pentru Cercetare Ştiințifică), Athens*

INDIA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Kaiga Atomic Power Station: 2 reactoare tip PHWR*
- *Kakrapar Atomic Power Station (KAPS): 2 reactoare tip PHWR*
- *Kudankulam Tamilnadu: 2 reactoare tip VVER PWR (în curs de construire)*
- *Madras Atomic Power Station (MAPS): 2 reactoare tip PHWR la Kalpakkam*
- *Narora Atomic Power Station (NAPS): 2 reactoare tip PHWR*
- *Rajasthan Atomic Power Station (RAPS): 2 reactoare în curs de construcție*
- *Tarapur Atomic Power Station (TAPS): 2 reactor BWR plus 2 reactoare tip PHWR la Tarapur (reactorul de 540 MWe Tarapur-3 a fost conectat în Iunie 2006)*

Reactoare de cercetare

Kalpakkam - IGCAR

- *Un reactor tip FBTR (Fast Breeder Test Reactor)*
- *Un reactor KAMINI*
- *Un prototip de reactor FBR de 500 MWe aflat în construcție*

Trombay - BARC

- *Reactorul CIRUS*
- *Reactorul Dhruva*
- *Reactorul Apsara*

INDONEZIA

- *Bandung: 2 reactoare tip TRIGA Mark II, unul de 250 kWe instalat în 1965, şi al doilea de 2 MWe instalat în1997*

- *Yogyakarta: reactor tip TRIGA Mark II de 100 kWe instalat în 1979*
- *Serpong: un reactor tip SIWABESSY de 30 MWth (Multi-Purpose Reactor) instalat în 1987*

IRAN

Reactoare de cercetare

Tehran

- *Reactor tip TRIGA la Tehran Nuclear Research Center construit de Statele Unite în 1967*

Isfahan, Nuclear Technology Center (cele mai multe construite de China)

- *MNSR de 27 kW, reactor miniatură ca sursă de neutroni*
- *Light Water Subcritical Reactor (LWSCR)*
- *Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR)*
- *Graphite Subcritical Reactor (GSCR)*

Bonab Nuclear Research Center

Ramsar Nuclear Research Center

Centrale Nuclearo-Electrice

Bushehr

- *Bushehr-1: reactor VVER de 915MWe (în curs de construcţie în 2006)*
- *Bushehr-2: construcţie suspendată*

Reactoare pentru producţia de apă grea

- *Arak: IR-40 Heavy Water Reactor (în curs de construcţie, planificat pentru 2014)*

Centrale cu uraniu îmbogăţit

- *Natanz*
- *Kahsan*

Centre de combustibil nuclear

- *Yazd*
- *Ardekan*

IRAQ

- *Osiraq: "Tammuz 1" (distrus de aviaţia israeliană pe 7 Iunie 1981)*

ISRAEL

- *Negev Nuclear Research Center EL-102: reactor de cercetare cu uraniu şi apă grea, original de 24 MWe (construit de Franţa în 1062)*
- *Soreq Nuclear Research Center: reactor de cercetare de 5 MWe cu apă uşoară (construit de Statele Unite în 1960)*

ITALIA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Latina: reactor tip Magnox, 1 unit de 160 MWe, funcțional 1963-1987, oprit după referendumul italian asupra Centralelor Nuclearo-Electrice*
- *Caorso: reactor BWR oprit după referendumul italian asupra Centralelor Nuclearo-Electrice*
- *Trino Vercellese: oprit după referendumul italian asupra Centralelor Nuclearo-Electrice*
- *Alto Lazio : oprit după referendumul italian asupra Centralelor Nuclearo-Electrice*

Reactoare de cercetare

- *Pavia: reactor tip TRIGA Mark II, la University of Pavia Mark II (instalat în 1965)*
- *Rome: reactor tip TRIGA Mark II, la ENEA Casaccia Research Center (instalat în 1960)*

JAMAICA

- Kingston: 2 reactoare tip SLOWPOKE

JAPONIA

Centrale Nuclearo-Electrice

Tomari (3 reactoare tip PWR) operate de Hokkaido Electric Power Company

- *Tomari-1 (PWR 579 MWe)*
- *Tomari-2 (PWR 579 MWe)*
- *Tomari-3 (PWR 912 MWe, operațional din 2009/12)*

Higashidori (1 reactor tip BWR) operat de Tohoku Electric Power Co., Inc. & Tokyo Electric Power Company, Inc.

- *Higashidori-1 (BWR 1,1GWe, pus în funcțiune din 2005/12/8)*

Onagawa (3 reactoare tip BWR) operate de Tohoku Electric Power Company, Inc.

- *Onagawa-1 (BWR 524 MWe)*
- *Onagawa-2 (BWR 825 MWe)*
- *Onagawa-3 (BWR 825 MWe)*

Fukushima Daiichi (6 reactoare BWR) operate de Tokyo Electric Power Company, Inc.

- *Fuku1-1 (BWR 460 MWe)*
- *Fuku1-2 (BWR 784 MWe)*
- *Fuku1-3 (BWR 784 MWe)*
- *Fuku1-4 (BWR 784 MWe)*

- *Fuku1-5 (BWR 784 MWe)*
- *Fuku1-6 (BWR 1,1 GWe)*

Fukushima Daini (4 reactoare tip BWR) operate de Tokyo Electric Power Company, Inc.

- *Fuku2-1 (BWR 1,1 GWe)*
- *Fuku2-2 (BWR 1,1 GWe)*
- *Fuku2-3 (BWR 1,1 GWe)*
- *Fuku2-4 (BWR 1,1 GWe)*

Tokai Japan Atomic Power Company

- *Tokai (Magnox GCR 166 MWe, 1966-1998)*

Tokai Daini Japan Atomic Power Company

- *To2 (BWR 1,1 GWe, conectat la rețea în 1978)*

Kashiwazaki Kariwa (5 reactoare BWR + 2 reactoare ABWR) operate de Tokyo Electric Power Company, Inc.

- *KashiKari-1 (BWR 1,1 GWe)*
- *KashiKari-2 (BWR 1,1 GWe)*
- *KashiKari-3 (BWR 1,1 GWe)*
- *KashiKari-4 (BWR 1,1 GWe)*
- *KashiKari-5 (BWR 1,1 GWe)*
- *KashiKari-6 (ABWR 1,356 GWe)*
- *KashiKari-7 (ABWR 1,356 GWe)*

Hamaoka (4 reactoare BWR + 1 reactor ABWR) operate de Chubu Electric Power Company

- *Hamaoka-1 (BWR 540 MWe)*
- *Hamaoka-2 (BWR 840 MWe)*
- *Hamaoka-3 (BWR 1,1 GWe)*
- *Hamaoka-4 (BWR 1,137 GWe)*
- *Hamaoka-5 (ABWR 1,38 GWe)*

Shika (reactoare tip BWR şi ABWR) operate de Hokuriku Electric Power Company

- *Shika-1 (BWR 540 MWe)*
- *Shika-2 (ABWR 1,358 GWe intrat în funcțiune în 2006/3)*

Tsuruga (două reactoare) operate de Japan Atomic Power Company

- *Tsuruga-1 (BWR 357 MWe)*
- *Tsuruga-2 (PWR 1,160 GWe)*

Mihama (3 reactoare tip PWR) operate de Kansai Electric Power Company, Inc.

- *Mihama-1 (PWR 340 MWe)*
- *Mihama-2 (PWR 500 MWe)*

- *Mihama-3 (PWR 826 MWe)*

Ohi (4 reactoare tip PWR) operate de Kansai Electric Power Company, Inc.

- *Ohi-1 (PWR 1,175 GWe)*
- *Ohi-2 (PWR 1,175 GWe)*
- *Ohi-3 (PWR 1,180 GWe)*
- *Ohi-4 (PWR 1,180 GWe)*

Takahama (4 reactoare tip PWR) operate de Kansai Electric Power Company, Inc.

- *Takahama-1 (PWR 826 MWe)*
- *Takahama-2 (PWR 826 MWe)*
- *Takahama-3 (PWR 870 MWe)*
- *Takahama-4 (PWR 870 MWe)*

Shimane (2 reactoare tip BWR) operate de Chugoku Electric Power Company, Inc.

- *Shimane-1 (BWR 460 MWe)*
- *Shimane-2 (BWR 820 MWe)*

Ikata (3 reactoare tip PWR) operate de Shikoku Electric Power Company, Inc.

- *Ikata-1 (PWR 566 MWe)*
- *Ikata-2 (PWR 566 MWe)*
- *Ikata-3 (PWR 890 MWe)*

Genkai (4 reactoare tip PWR) operate de Kyushu Electric Power Company, Inc.

- *Genkai-1 (PWR 559 MWe)*
- *Genkai-2 (PWR 559 MWe)*
- *Genkai-3 (PWR 1,180 GWe)*
- *Genkai-4 (PWR 1,180 GWe)*

Sendai (2 reactoare tip PWR) operate de Kyushu Electric Power Company, Inc.

- *Sendai-1 (PWR 890 MWe)*
- *Sendai-2 (PWR 890 MWe)*

Reactoare de cercetare

Reactoare JAEA (Japan Atomic Energy Agency)

- *Tokai JRR-1(Japan Research Reactor No.1 = reactorul japonez de cercetare nr.1, oprit)*
- *Tokai JRR-2 (oprit)*
- *Tokai JRR-3*
- *Tokai JRR-4*

- *Tokai JPDR (Japan Power Demonstration Reactor = reactorul japonez de demonstrație, oprit)*
- *Oarai HTTR (High-Temp engineering Test Reactor = reactorul japonez de înaltă temperatură)*
- *Oarai JMTR (Japan Materials Testing Reactor = reactorul japonez de testare a materialelor)*
- *Naka JT-60, reactor de fuziune*
- *Fugen (ATR – Advanced Thermal Reactor = reactor termic avansat, oprit)*
- *Jyouyou (reactor tip FBR)*
- *Monju (reactor tip FBR)*
- *Universitatea din Kinki: UTR-KINKl*
- *Universitatea din Kyoto: KUR*
- *Musashi Institute of Technology: MITRR (TRIGA-II) (oprit în 1990)*
- *Universitatea din Rikko: RUR (TRIGA-II) (oprit)*
- *Universitatea din Tokio: Yayoi*

KAZAKHSTAN

Centrale Nuclearo-Electrice

Aktau: Kazakhstan State Corporation for Atomic Power and Industry

- *Reactorul BN-350 de 135 MWe (oprit 1999)*

Reactoare de cercetare

Alatau, Institute of Nuclear Physics of the National Nuclear Center

- *Reactor VVR-K de 10 MWe*

Kurchatov: National Nuclear Center, centrul de testări Semipalatinsk

- *Reactor IVG-1M de 60 MW e*
- *Reactor RA, moderat cu hidridă de zirconiu (dezafectat)*
- *Reactor în impuls cu grafit IGR (Impulse Graphite Reactor) de 50 MWe*

LETONIA

Salaspils: Centrul ce Cercetări Nucleare (Nuclear Research Center)

- *Reactor de cercetare de 5 MWe (oprit)*

LIBIA

- *Tajura Nuclear Research Center: reactor de cercetare de 10 MWe (clădit de fosta URSS)*

LITUANIA

Centrala Nuclearo-Electrică Ignalina:

- *Ignalina-1, reactor RBMK, oprite pe 31 Decembrie 2004 la cererea Uniunii Europene*
- *Ignalina-2, reactor RBMK, prevăzut să fie oprit în 2009*

MALAEZIA

- *Kuala Lumpur: reactor TRIGA Mark II, operat de Malaysian Institute for Nuclear Technology, instalat în 1982*

MAREA BRITANIE

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Berkeley, Gloucestershire*
- *Bradwell, Essex (exploatare încetată în 2002, descărcare combustibil din 2005)*
- *Calder Hall, Sellafield, Cumbria (exploatare încetată în 2003)*
- *Chapelcross, Dumfries and Galloway (exploatare încetată în Iunie 2004)*
- *Dungeness A, Kent (exploatare încetată în 2006)*
- *Dungeness B, Kent*
- *Hartlepool, Hartlepool*
- *Heysham Power Stations, Lancashire*
- *Hinkley Point, Somerset (exploatare încetată în 2000, descărcare combustibil din 2005)*
- *Hinkley Point B, Somerset*
- *Hunterston A, North Ayrshire (exploatare încetată în 1989)*
- *Hunterston B, North Ayrshire*
- *Oldbury, Gloucestershire (exploatarea urmează să înceteze din 2008)*
- *Sizewell A, Suffolk (exploatarea încetată în 2006)*
- *Sizewell B, Suffolk (reactor PWR)*
- *Sizewell C, Suffolk (reactor PWR)*
- *Sizewell D, Suffolk (reactor PWR)*
- *Torness, East Lothian*
- *Trawsfynydd, Gwynedd (exploatare încetată în 1991)*
- *Wylfa, Anglesey (exploatarea urmează să înceteze din 2010)*

Reactoare de cercetare

- *Aldermaston: reactor VIPER exploatat de Atomic Weapons Establishment*
- *Ascot: reactor CONSORT exploatat de Imperial College London, Silwood Park campus*

- *Billingham: reactor TRIGA Mark I, rafinărie ICI (instalat în 1971, oprit în 1988)*
- *Culham: reactor de fuziune JET*
- *Derby: reactor Neptune, operat de Rolls-Royce Marine Power Operations Ltd, Raynesway*
- *Dounreay: reactor VULCAN operat de Rolls-Royce Naval Marine*
- *Dounreay: reactor PWR2 operat de Rolls-Royce Naval Marine*
- *Dounreay: reactor DMTR*
- *Dounreay: reactor rapid reproducător (oprit în 1994)*
- *Dounreay: reactor rapid (prototip)*
- *East Kilbride: reactor operat de Scottish Universities Research şi Reactor Centre (dezactivat în 1995, dărâmat complet în 2003)*
- *Harwell AERE: reactorul GLEEP (oprit în 1990)*
- *Harwell AERE: reactorul BEPO (oprit în 1968)*
- *Harwell AERE: reactorul LIDO (oprit în 1974)*
- *Harwell AERE: reactorul DIDO (oprit în 1990)*
- *Harwell AERE: reactorul PLUTO (oprit în 1990)*
- *Greenwich: reactorul JASON PWR (dezactivat în 1999)*
- *Stratford Marsh: reactorul Queen Mary operat de University of London (construit în 1966, dezactivat în 1982, distrus complet)*
- *Risley: reactor de cercetare universitar*
- *Sellafield (numit Windscale până în 1971): PILE 1 (oprit în 1957 după incendiul Windscale)*
- *Sellafield (numit Windscale până în 1971):PILE 2 (oprit în 1957)*
- *Sellafield (numit Windscale până în 1971): reactorul WAGR (oprit în 1982)*
- *Winfrith, Dorchester, Dorset: 9 reactoare oprite în 1990, inclusiv reactorul Dragon*

MAROC

- *Rabat: reactor TRIGA aflat în curs de construcție*

MEXIC

- *Laguna Verde: 2 reactoare tip BWR*
- *Mexico City: reactor TRIGA Mark III, operat de National Institute for Nuclear Research*

- *Mexico City: reactor de cercetare subcritic, operat de National Polytechnic Institute*
- *Zacatecas: reactor de cercetare subcritic, operat de Autonomous University of Zacatecas*

OLANDA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Borssele: reactor PWR de 452 MWe*
- *Dodewaard: reactor BWR de 55 MWe (oprit în 1997)*

Reactoare de cercetare

- *Delft: reactorul operat de Interfaculty Reactor Institute, parte a Delft University of Technology*
- *Petten: reactorul nuclear Petten*

NORVEGIA

Reactoare de cercetare

Kjeller:

- *Reactorul NORA (activat în 1961, oprit în 1967)*
- *Reactorul JEEP I (activat în 1951, oprit în 1967)*
- *Reactorul JEEP II (activat în 1966)*

Halden:

- *Reactor de tipul Halden boiling water reactor (HBWR), activat în 1959*

PAKISTAN

- *Chasnupp: reactor PWR de 300 MWe*
- *Kanupp: reactor PHWR de 125 MWe*
- *Khushab: reactor cu plutoniu de 50-70 MWT (operată de armată; nu se află sub control IAEA)*

PANAMA

- *Centrală Nuclearo-Electrică mobilă pentru Canalul Panama (operațional în perioada 1966 – 1976)*

PORTUGALIA

- *Sacavem: RPI, reactor de cercetare de 1 MWt cu piscină, operat de Instituto Tecnológico e Nuclear (Institutul Tehnologic şi Nuclear)*

POLONIA

- *Reaktor Ewa: reactor de cercetare de 10 MWe (dezactivat în 1995)*
- *Reaktor_Maria: reactor de cercetare de 30 MWe*

PUERTO RICO

- *Mayagüez: reactor TRIGA (dezactivat)*
- *BONUS: reactor BWR supraîncălzit, (dezactivat)*

ROMÂNIA

Centrale Nuclearo-Electrice

Cernavodă:

- *Cernavodă-U1: reactor PHWR tip CANDU de 700 MWe*
- *Cernavodă-U2: reactor PHWR tip CANDU de 700 MWe (în curs de construcție)*

Fabrică de combustibil

- *Piteşti: fabrică de combustibil CANDU*
- *Turnu Severin – Halânga: fabrică de apă grea*

Reactoare de cercetare

- *Piteşti: reactor de cercetare TRIGA, operat de Institutul de Cercetări Nucleare*

RUSIA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Balakovo*
- *Beloyarsk NPP, Zarechny, Sverdlovsk: reactor BN-600*
- *Bilibino*
- *Kalinin / Udomlya*
- *Kola / Polyarnye Zori*
- *Kursk*
- *Leningrad / Sosnovy Bor*
- *Novovoronezhskaya*
- *Seversk / Tomsk*
- *Smolensk*
- *Volgodonsk / Rostov*

Reactoare de cercetare

Rusia are aproximativ 109 reactoare de cercetare dintre care amintim:

- *Reactorul de fuziune T-15 de la Institutul Kurchatov*

SERBIA

Reactoare de cercetare

Vinča Institute - Center for Nuclear Technologies and Research

- *RA - Reaktor A (operațional 1956-2002): reactor de cercetare de 6.5 MWe moderat şi răcit cu apă grea*
- *RB - Reaktor B (operațional din 1958): la început reactorul RB a fost proiectat şi construit ca un ansamblu critic fără reflector, de putere zero, folosind uraniu natural şi apă grea. Prima criticitate a atins-o în Aprilie 1958. Mai târziu, s-a obținut şi folosit în miezul reactorului uraniu metalic îmbogățit 2% şi UO_2 îmbogățit 80%. Modificările sistemelor*

de control, securitate şi dozimetrie (realizate în anii 1960, 1976, 1988) au convertit ansamblul critic RB într-un reactor experimental flexibil cu apă grea, operând la puteri de 1 ÷ 50 We. În anii 90 au fost proiectate şi construite la reactorul RB unele sisteme rapide cuplate termic, pentru cercetări privind fizica reactorilor rapizi

SLOVACIA

Bohunice:

- *Bohunice V-1: 2 reactoare WWER-440 / V230*
- *Bohunice V-2: 2 reactoare WWER-440 / V213*
- *Bohunice A-1: un reactor de 388 MWe (oprit în anul 1977 după un accident de reîncărcare; în prezent în curs de dezactivare)*

Mochovce:

- *2 reactoare WWER-440 / V213*
- *2 reactoare WWER-440 / V213 (în curs de construcţie)*

SLOVENIA

- *Krško: reactor PWR de 670 MWe*
- *Ljubljana: reactor de cercetare TRIGA Mark II, operat de Jožef Stefan Institute (construit în 1966 de Statele Unite)*

SPANIA

Centrale Nuclearo-Electrice

Almaraz:

- *Almaraz-1: putere 1.032 MWe*
- *Almaraz-2: putere 1.027 MWe*

Ascó

- *Ascó-1: putere 930 MWe*
- *Ascó-2: putere 930 MWe*

Alte Centrale Nuclearo-Electrice

- *Cofrentes: putere 994 MWe*
- *Santa María de Garoña: putere 460 MWe*
- *Trillo - 1.066 MWe*

Vandellòs GCR, Tarragona

- *Vandellòs-1: oprit după incendiul din 1989*
- *Vandellòs-2: putere 992 MWe*

Reactoare de cercetare

- *Reactorul Argos de 10 kW, tip Argonaut, operat de Polytechnic University, Barcelona şi oprit în 1992*
- *Reactorul CORAL-I*

SIRIA

- *Reactor – sursă miniaturală de neutroni*

STATELE UNITE ALE AMERICII

Centrale Nuclearo-Electrice

NRC Region One (Northeast)

- *Beaver Valley, Pennsylvania*
- *Calvert Cliffs, Maryland*
- *Connecticut Yankee, Connecticut (dezafectat)*
- *FitzPatrick, New York*
- *Ginna, New York*
- *Hope Creek, New Jersey*
- *Indian Point, New York*
- *Limerick, Pennsylvania*
- *Maine Yankee, Maine (dezafectat)*
- *Millstone, Connecticut*
- *Nine Mile Point, New York*
- *Oyster Creek, New Jersey*
- *Peach Bottom, Pennsylvania*
- *Pilgrim, Massachusetts*
- *Salem, New Jersey*
- *Saxton, Pennsylvania (dezafectat)*
- *Seabrook, New Hampshire*
- *Shippingport, Pennsylvania (dezafectat)*
- *Shoreham, New York (dezafectat)*
- *Susquehanna, Pennsylvania*
- *Three Mile Island, Pennsylvania*
- *Vermont Yankee, Vermont*
- *Yankee Rowe, Massachusetts (dezafectat)*

NRC Region Two (South)

- *Bellefonte, Alabama (neterminat)*
- *Browns Ferry, Alabama*
- *Brunswick, North Carolina*
- *Carolinas-Virginia Tube Reactor, South Carolina (dezafectat)*
- *Catawba, South Carolina*
- *Crystal River 3, Florida*
- *Farley (Joseph M. Farley), Alabama*
- *Hatch (Edwin I. Hatch), Georgia*
- *McGuire, North Carolina*
- *North Anna, Virginia*
- *Oconee, South Carolina*

- *H.B. Robinson, South Carolina*
- *Sequoyah, Tennessee*
- *Shearon Harris, North Carolina*
- *St. Lucie, Florida*
- *Surry, Virginia*
- *Turkey Point, Florida (lovit de uraganul Andrew)*
- *Virgil C. Summer (Summer), South Carolina*
- *Vogtle, Georgia*
- *Watts Bar, Tennessee*

NRC Region Three (Midwest)

- *Big Rock Point, Michigan (dezafectat)*
- *Braidwood, Illinois*
- *Byron, Illinois*
- *Clinton, Illinois*
- *Davis-Besse, Ohio*
- *Donald C. Cook, Michigan*
- *Dresden, Illinois*
- *Duane Arnold, Iowa*
- *Elk River, Minnesota (dezafectat)*
- *Enrico Fermi, Michigan*
- *Kewaunee, Wisconsin*
- *LaCrosse, Wisconsin (dezafectat)*
- *LaSalle County, Illinois*
- *Monticello, Minnesota*
- *Palisades, Michigan*
- *Perry, Ohio*
- *Piqua, Ohio (dezafectat)*
- *Prairie Island, Minnesota*
- *Quad Cities, Illinois*
- *Zion, Illinois (dezafectat)*

NRC Region Four (West)

- *Arkansas Nuclear One, Arkansas*
- *Callaway, Missouri*
- *Columbia, Washington: vechea WNP-2*
- *Comanche Peak, Texas*
- *Cooper, Nebraska*
- *Diablo Canyon, California*
- *Fort Calhoun, Nebraska*
- *Fort Saint Vrain, Colorado (dezafectat)*
- *Grand Gulf, Mississippi*

- *Hallam, Nebraska (dezafectat)*
- *Hanford N Reactor, Washington („pensionat”)*
- *Humboldt Bay, California (dezafectat)*
- *Palo Verde, Arizona*
- *Pathfinder, South Dakota (dezafectat)*
- *Rancho Seco, California (dezafectat)*
- *River Bend, Louisiana*
- *San Onofre, California*
- *South Texas, Texas*
- *Trojan, Rainier, Oregon (dezafectat)*
- *Vallecitos, California (centru de cercetare)*
- *Waterford, Louisiana*
- *Wolf Creek, Kansas*

Reactoare pentru producția de plutoniu

Hanford Site, Washington

- *B-Reactor (Pile): păstrat ca muzeu*
- *F-Reactor (Pile): acoperit în beton*
- *D-Reactor (Pile): acoperit în beton*
- *H-Reactor (Pile): începută acoperirea în beton*
- *DR-Reactor (Pile): acoperit în beton*
- *C-Reactor (Pile): acoperit în beton*
- *KE-Reactor (Pile): începută acoperirea în beton*
- *KW-Reactor (Pile): începută acoperirea în beton*
- *N-Reactor: începută acoperirea în beton*

Savannah River Site, South Carolina

- *R-Reactor (apă grea)*
- *P-Reactor (apă grea)*
- *L-Reactor (apă grea)*
- *K-Reactor (apă grea)*
- *C-Reactor (apă grea)*

Reactoare de cercetare

Arkansas

- *SEFOR - oprit*

Argonne National Laboratory, Illinois (şi Idaho)

- *CP-1 - Chicago Pile 1 – oprit*
- *CP-2 - Chicago Pile 2 – oprit*
- *CP-3 - Chicago Pile 3 – oprit*
- *CP-5 - Chicago Pile 5 – oprit din 1979*
- *EBWR - Experimental Boiling Water Reactor – oprit*
- *LMFBR - Liquid Metal Fast Breeder Reactor – oprit*

- *Janus Reactor – oprit din 1992*
- *JUGGERNAUT – oprit*
- *IFR - Integral Fast Reactor – niciodată operațional*

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

- *High Flux Beam Reactor – oprit din 1999*
- *Medical Research Reactor – oprit din 2000*
- *Brookhaven Graphite Research Reactor – oprit din 1968*

Hanford Site, Washington

- *Fast Flux Test Facility – în stare de aşteptare la rece*

Idaho National Environmental and Engineering Laboratory, Idaho

- *ARMF-I – oprit*
- *AMRF-II – oprit*
- *ATR – **operațional***
- *ATRC – **operațional***
- *AFSR – oprit*
- *BORAX-I – oprit*
- *BORAX-II – oprit*
- *BORAX-III – oprit*
- *BORAX-IV – oprit*
- *BORAX-V – oprit din 1964*
- *CRCE – oprit*
- *CFRMF – oprit*
- *CET – oprit*
- *ETR – oprit*
- *ETRC – oprit*
- *EBOR niciodată operațional*
- *EBR-I - Experimental Breeder Reactor I (original CP-4) – oprit*
- *EBR-II - Experimental Breeder Reactor II – oprit*
- *ECOR – niciodată operațional*
- *710 – oprit*
- *GCRE - Gas Cooled Reactor Experiment – oprit*
- *HTRE-1 - Heat Transfer Reactor Experiment 1 – oprit*
- *HTRE-2 - Heat Transfer Reactor Experiment 2 – oprit*
- *HTRE-3 - Heat Transfer Reactor Experiment 3 – oprit*
- *603-A – oprit*
- *HOTCE – oprit*
- *A1W-A – oprit*
- *A1W-B – oprit*

- *LOFT – oprit*
- *MTR – oprit*
- *ML-1 - Mobil Low Power Plant – oprit*
- *S5G – oprit*
- *NRAD – **operațional***
- *FRAN – oprit*
- *OMRE – oprit*
- *PBF – oprit*
- *RMF – oprit*
- *SUSIE – **operațional***
- *SPERT-I – oprit*
- *SPERT-II – oprit*
- *SPERT-III – oprit*
- *SPERT-IV – oprit*
- *SCRCE – oprit*
- *SL-1/ALPR - Stationary Low Power Plant – oprit*
- *S1W/STR – oprit*
- *SNAPTRAN-1 – oprit*
- *SNAPTRAN-2 – oprit*
- *SNAPTRAN-3 – oprit*
- *THRITS – oprit*
- *TREAT – oprit*
- *ZPPR - Zero Power Physics Reactor (fost Zero Power Plutonium Reactor) – în aşteptare*
- *ZPR-III – oprit*
- *Nevada Test Site, Nevada*
- *BREN Tower*
- *Oak Ridge National Laboratory*
- *X-10 Graphite Reactor – oprit*
- *Oak Ridge Research Reactor – oprit*
- *Bulk Shielding Reactor – oprit*
- *Tower Shielding Reactor – oprit*
- *Molten-Salt Reactor Experiment – oprit*
- *High Flux Isotope Reactor – **operațional***

Reactoare civilie şi de cercetare licențiate să opereze

- *Aerotest Operations Inc., San Ramon, California - TRIGA Mark I*
- *Armed Forces Radiobiological Research Institute, Bethesda, Maryland - TRIGA Mark I*
- *Cornell University, Ithaca, New York - TRIGA Mark II*

- *Dow Chemical Company, Midland, Michigan - TRIGA Mark I*
- *General Electric Company, Sunol, California - "Nuclear Test"*
- *Idaho State University, Pocatello, Idaho - AGN-201 #103*
- *Kansas State University, Manhattan, Kansas - TRIGA Mark I*
- *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts - HWR Reflected*
- *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland - TRIGA Mark I*
- *North Carolina State University, Raleigh, North Carolina - Pulstar*
- *Ohio State University, Columbus, Ohio - Pool (modificat de Lockheed)*
- *Oregon State University, Corvallis, Oregon - TRIGA Mark II*
- *Penn State University, University Park, Pennsylvania - TRIGA*
- *Purdue University, West Lafayette, Indiana - Lockheed*
- *Reed College, Portland, OR - TRIGA Mark I*
- *Rensselaer Polytechnic Institute, Schenectady, New York – ansamblu critic*
- *Rhode Island Atomic Energy Commission, Narrangansett, Rhode Island - GE Pool*
- *Texas A&M University, College Station, TX (două reactoare) - AGN-201M #106, TRIGA Mark I*
- *University of Arizona, Tucson, AZ - TRIGA Mark I*
- *University of California, Berkeley, Berkeley, California - TRIGA Mark III – oprit*
- *University of California, Davis, Sacramento, California - TRIGA*
- *University of California, Irvine, Irvine, California - TRIGA Mark I*
- *University of Florida, Gainesville, Florida - Argonaut*
- *University of Maryland, College Park, College Park, Maryland - TRIGA Mark I*
- *University of Massachusetts, Lowell, Massachusetts*
- *University of Michigan, Ann Arbor, Michigan – cu piscină*
- *University of Missouri, Columbia, Missouri - General Electric cu vas (10 MWe)*
- *University of Missouri, Rolla, Missouri – cu piscină*

- *University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico - AGN-201M $112*
- *University of Texas at Austin, Austin, Texas - TRIGA Mark II*
- *University of Utah, Salt Lake City, Utah - TRIGA Mark I*
- *University of Wisconsin, Madison, Wisconsin - TRIGA Mark I*
- *U.S. Geological Survey, Denver, Colorado - TRIGA Mark I*
- *U.S. Veterans Administration, Omaha, Nebraska - TRIGA Mark I*
- *Washington State University, Pullman, Washington - TRIGA Mark I*
- *Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts - GE*

Reactoare de cercetare şi testare aflat în curs de dezafectare

- *CBS Corporation, Waltz Mill, Pennsylvania*
- *General Atomics, San Diego, California (două reactoare)*
- *Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia*
- *Iowa State University, Ames, Iowa*
- *Manhattan College, Riverdale, New York*
- *National Aeronautics and Space Administration, Sandusky, Ohio (două reactoare)*
- *Saxton Nuclear Experimental Corporation, Saxton, Pennsylvania (un reactor de putere)*
- *University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois*
- *University of Washington, Seattle, Washington*
- *University of Virginia, Charlottesville, Virginia (două reactoare)*

Reactoare de cercetare şi testare care au numai licență de posesie de combustibil nuclear, fără să aibă şi licență de operare; sunt oprite permanent

- *Cornell University Zero Power Reactor, Ithaca, New York*
- *General Electric Company, Sunol, California (două reactoare de cercetare şi unul de putere)*
- *Nuclear Ship Savannah, James River Reserve Fleet, Virginia (un reactor de putere)*
- *University at Buffalo*

SUEDIA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Barsebäck 1: reactor BWR de 630 MWe, operațional 1975-1999, oprit*
- *Barsebäck 2: reactor BWR de 630 MWe, operațional 1977-2005, oprit*
- *Forsmark 1: reactor BWR de 1.018 MWe, operațional din 1980*
- *Forsmark 2: reactor BWR de 960 MWe, operațional din 1981*
- *Forsmark 3: reactor BWR de 1.230 MWe, operațional din 1985*
- *Oskarshamn 1: reactor BWR de 500 MWe, operațional din 1972*
- *Oskarshamn 2: reactor BWR de 630 MWe, operațional din 1975*
- *Oskarshamn 3: reactor BWR de 1.200 MWe, operațional din 1985*
- *Ringhals 1: reactor BWR de 860 MWe, operațional din 1976*
- *Ringhals 2: reactor BWR de 870 MWe, operațional din 1975*
- *Ringhals 3: reactor BWR de 920 MWe, operațional din 1981*
- *Ringhals 4: reactor BWR de 910 MWe, operațional din 1983*

Reactoare de cercetare

- *KTH, Stockholm: reactor de cercetare R1 de 1 MWe, operațional 1954-1970 (dezafectat)*
- *Studsvik: reactor de cercetare şi producție de izotopi pentru industrie R2 de 50 MWe, operațional 1960-2005 (oprit)*
- *Studsvik: reactor de cercetare şi producție de izotopi pentru industrie R2-0 de 1 MWe, operațional 1960-2005 (oprit)*
- *Farsta, Stockholm: reactor pentru încălzire termică locală Ågesta (R3) de 89 MWe, operațional 1963-1973 (oprit)*
- *Marviken, Norrköping: reactor de cercetare şi producție de plutoniu R4, niciodată definitivat (abandonat în 1970)*
- *Studsvik: reactor de cercetare „zero putere” FR-0, operațional 1864-1971, dezafectat*

TAIWAN

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Chin Shan Nuclear Power Plant: 2 reactoare BWR*
- *Kuosheng Nuclear Power Plant: 2 reactoare BWR*
- *Lungmen Nuclear Power Plant: 2 reactoare ABWR (în curs de construcție)*
- *Maanshan Nuclear Power Plant: 2 reactoare PWR*

Reactoare de cercetare

- *Taipei: reactor TRIGA operat de Tsing Hua University (instalat în 1977)*

THAILANDA

- *Bangkok: reactor TRIGA operat de Office of Atoms for Peace (instalat în 1977)*
- *Bangkok: reactor TRIGA MPR 10 operat de Ongkharak Nuclear Research Center (în curs de construcție)*

TURCIA

- *Reactorul TRIGA Mark II operat de Technical University of Istanbul (instalat 1979)*
- *Până în 2015 se vor construi cel puțin 3 Centrale Nuclearo-Electrice cu reactoare din Generațiile a III-a şi a IV-a (planificat)*

UCRAINA

Centrale Nuclearo-Electrice

- *Chernobîl-1: reactor RBMK-1000 LWGR (oprit în 1996)*
- *Chernobîl-2: reactor RBMK-1000 LWGR (oprit în 1991)*
- *Chernobîl-3: reactor RBMK-1000 LWGR (oprit în 2000)*
- *Chernobîl-4: reactor RBMK-1000 LWGR (explodat în accidentul din 1986)*
- *Khmelnytskyi: 2 reactoare WWER*
- *Rivne: 4 reactoare WWER*
- *South Ukraine, Konstantinovka: 3 reactoare PWR*
- *Zaporizhzhia: 6 reactoare WWER*

Reactoare de cercetare

- *Kiev: Institute for Nuclear Research (Institutul de Cercetări Nucleare)*
- *Sevastopol: Institute of Nuclear Energy and Industry (Institutul pentru Energie Nucleară şi Industrie)*

UNGARIA

- *Paks: 4 reactoare tip VVER de 430 MWe*

Budapesta

- *Technical University din Budapesta (BME) Institute of Nuclear Techniques - University Research Reactor*
- *KFKI Atomic Energy Research Institute: reactor de cercetare de 10 MWe*

Debrecen

- *Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences: un ciclotron de 20 MV şi un accelerator Van de Graff de 5 MWe putere*

URUGUAI

- *Reactorul URR*

UZBEKISTAN

- *Ulugbek, Tashkent: reactor cu vas de presiune VVER-SM (oprit)*

VENEZUELA

- *Reactorul RV-1*

VIETNAM

- *Da Lat: reactor TRIGA Mark II (construit de Statele Unite în 1963, oprit în 1975, reactivat de URSS în 1984)*

- ABREVIERI

A

ABWR: *Advanced Boiling Water Reactor (Reactor avansat cu apă în fierbere)*

ACPR: *Annular Core Pulse Reactor (Reactor pulsat cu zonă activă inelară)*

ACRR: *Annular Core Research Reactor (Reactor de cercetare cu zonă activă inelară)*

ADPR: *Advanced Double Pool Reactor (Reactor avansat cu piscină dublă)*

AGR: *Advanced Gas-Cooled Reactor (Reactor avansat răcit cu gaz).*

ALMR: *Advanced Liquid Metal Reactor (Reactor avansat răcit cu metal lichid).*

ALPR: *Argonne Low Power Reactor (Reactor de putere scăzută de la Argonne)*

ALRR: *Ames Laboratory Research Reactor (Reactorul de cercetare al Laboratoarelor Ames)*

ALWR: *Advanced Light Water Reactor (Reactor avansat cu apă uşoară).*

AP: *Advanced Passive (Reactor avansat cu securitate pasivă)*

ARIANE: *Atomic Reactor for Irradiations and Neutronic Experiments (Reactorul atomic pentru iradieri şi experimente)*

ATR: *Advanced Thermal Reactor = Reactor termic avansat*

B

BHWR: *Boiling Heavy Water Reactor (Reactor cu apă grea în fierbere).*

BWR: *Boiling Water Reactor (Reactor cu apă în fierbere)*

C

CAESAR: *Clean And Environmentally Safe Advanced Reactor (Reactor avansat, curat şi sigur pentru mediul înconjurător)*

CANDU: *Canadian Deuterium-Uranium Reactor (Reactor canadian cu uraniu natural şi apă grea)*

CFR: *Commercial Fast Reactor (Reactor rapid comercial)*

CPR: *Commercial Power Reactor (Reactor de putere comercial)*

D

DEMO: *Demonstration Reactor (Reactor de demonstraţie)*

E

EBR: *Experimental Breeder Reactor (Reactor reproducător experimental)*

EPR: *European Pressurized Reactor (Reactor sub presiune european.)*

ESBWR: *Economic Simplified Boiling Water Reactor (Reactor economic simplificat cu apă în fierbere)*

F

FBR: *Fast Breeder Reactor (Reactor reproducător cu neutroni rapizi)*

G

GCFR: *Gas-Cooled Fast Reactor (Reactor rapid răcit cu gaz)*

GCHWR: *Gas-Cooled Heavy Water Moderated Reactor (Reactor răcit cu gaz şi moderat cu apă grea)*

GCR: *Gas-Cooled Reactor (Reactor răcit cu gaz)*

GFR: *Gas Fuelled Reactor (Reactor cu combustibil gazos)*

GGR: *Gas-Graphite Reactor (Reactor răcit cu gaz şi moderat cu grafit)*

GHR: *Gas-Cooled Heating Reactor (Reactor de încălzire răcit cu gaz)*

H

HTR: *High Temperature Reactor (Reactor de temperatură înaltă)*

HTTR: *High Temperature Test Reactor (Reactor de testare de temperatură înaltă)*

HWR: *Heavy Water Reactor (Reactor cu apă grea)*

I

IAEA: *International Atomic Energy Agency (Agenţia Internaţională pentru Energia Nucleară - cu sediul la Viena)*

L

LMFBR: *Liquid Metal Fast Breeder Reactor (Reactor reproducător cu neutroni rapizi răcit cu metale lichide)*

LMFR: *Liquid Metal Fuel Reactor (Reactor cu combustibil dispersat în metal lichid)*

LMR: *Liquid Metal Reactor (Reactor cu metal lichid)*

LWBR: *Light Water Breeder Reactor (Reactor reproducător cu apă uşoară)*

LWGR: *High-power pressure-tube reactor, graphite-moderated pressure-tube reactor with boiling light water coolant (Reactor de putere cu tuburi de presiune, moderat cu grafit)*

LWR: *Light Water Reactor (Reactor cu apă uşoară)*

LWTR: *Light Water Test Reactor (Reactor experimental cu apă uşoară)*

M

MHTGR: *Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor (Reactor modular de temperatură înaltă răcit cu gaz)*

MSBR: *Molten Salt Breeder Reactor (Reactor reproducător cu săruri topite)*

MSPWR: *Mitsubishi Simplified Pressurized Water Reactor (Reactor cu apă sub presiune simplificat de Mitsubishi)*
MTR: *Materials Testing Reactor (Reactor de încercări de materiale)*
MZFR: *Multipurpose Research Reactor (Reactor de cercetare cu scopuri multiple)*

N

NPP: *Nuclear Power Plant (Centrală Nuclearo-Electrică)*
NRX: *National Research Experimental (Reactor experimental de cercetare NRX)*

O

OLMR: *Organic Liquid Moderated Reactor (Reactor moderat cu lichide organice)*
OPAL: *Open Pool Light-water (Reactor cu apă uşoară cu piscină deschisă)*
OR: *Operating Reactor (Reactor în funcţiune)*
ORGEL: *Organic-Cooled Heavy Water Moderated Power Reactor (Reactor răcit cu lichide organice şi moderat cu apă grea)*

P

PBMR: *Pebble Bed Modular Reactor (Reactor modular cu strat granular)*
PHWR: *Pressurized Heavy Water Reactor (Reactor cu apă grea sub presiune)*
PLBR: *Prototype Large Breeder Reactor (Reactor reproducător (prototip) de dimensionare)*

R

RBMK: *Реактор Большой Мощности Канальный – Reaktor Bolshoi Moschnosti Kanalnye (Reactor de putere cu tuburi de presiune, moderat cu grafit - Rusia)*

S

SAFR: *Sodium Advanced Fast Reactor (Reactor rapid avansat, cu sodiu)*
SMPR: *Small and Medium-Sized Power Reactor (Reactoare de putere mici şi mijlocii)*
SMR: *Solid Moderated Reactor (Reactor cu moderator solid)*

T

THTR: *Thorium High Temperature Reactor (Reactor de înaltă temperatură cu toriu)*
TRIGA: *Training of Personnel, Nuclear Research, Isotope Production, General Atomic (1. Program al companiei "General Atomic" de pregătire a personalului, cercetare nucleară şi producţie de*

radioizotopi; 2. Reactor nuclear de cercetare şi testare de materiale dezvoltat de compania "General Atomic")

TRISO: *Tristructural-isotropic fuel (Combustibilul izotopic tristructural)*

U

UNGG: *Gas-Graphite Reactor – GGR, Graphite Moderated Gas-Cooled Reactor (Reactor cu uraniu natural moderat cu grafit şi răcit cu gaz)*

V

VHTR: *Very High Temperature Reactor (Reactor de temperatură foarte înaltă)*

W

WWER: *Water-Cooled, Water Moderated Reactor (Reactor de putere răcit şi moderat cu apă - VVER în limba rusă)*

- GLOSAR

A

Actinidă: *element al cărui număr atomic este cuprins între 89 (actiniu) şi 102; actinidele sunt radioactive şi, în general, au timpi de înjumătățire lungi; prin urmare sunt semnificative atunci când se găsesc în deşeuri radioactive, adică în combustibilul ars; sunt folosite ca material fisil în reactorii rapizi.*

Activitate*: numărul de dezintegrări nucleare spontane pe unitatea de timp (în interiorul unei surse radioactive); se măsoară în becquereli.*

Agent de răcire: *lichid sau gaz utilizat pentru transferul de căldură din miezul reactorului către generatoare de abur, sau direct către turbine.*

Apă grea: *apă conținând o concentrație ridicată de molecule formate din atomi de deuteriu (D_2O).*

Apă uşoară: *apă normală (H_2O), ca distincție față de apa grea (D_2O).*

Atom: *particulă de substanță care nu mai poate fi „spartă" prin metode chimice; atomii au un nucleu constituit din protoni încărcați electric pozitiv şi, eventual, neutroni neîncărcați electric, de mase asemănătoare; sarcinile pozitive aferente protonilor sunt echilibrate printr-un număr adecvat de electroni încărcați electric negativ ce se găsesc într-o permanentă mişcare în jurul nucleului.*

B

Bară de control: *sistem destinat absorbției neutronilor astfel încât o reacție în lanț dintr-un reactor poate fi atenuată (până la oprire) prin inserare în zona combustibilului, sau accelerată prin scoatere din această zonă.*

Becquerel (Bq): *unitatea de măsură în SI (Sistem Internațional) pentru radioactivitatea intrinsecă a unui material; 1 Bq măsoară o dezintegrare pe secundă şi reprezintă activitatea unei cantități de material radioactiv care suferă <u>în medie</u> o dezintegrare pe secundă.*

Boxă cu mănuşi: *incintă etanşă la aer, echipată cu mănuşi, pentru manipulare sub control vizual a materialelor toxice şi radioactive.*

C

Calandria: *tip de vas al reactorului având tuburi interioare sau canale astfel dispuse încât să mențină moderatorul separat de agentul de răcire, să asigure posibilități de iradiere, sau să conțină tuburi de presiune.*

Canal de combustibil: *canal din interiorul unui reactor, proiectat să conţină unul sau mai multe fascicule combustibile şi prin interiorul căruia circulă agent de răcire.*

Ciclu de combustibil: *totalitatea etapelor prin care trece combustibilul nuclear, începând cu extragerea minereului şi terminând cu depozitarea deşeurilor radioactive.*

Coeficient de vid: *derivata parţială a reactivităţii în raport cu fracţia de vid.*

Combustibil ars: *combustibilul nuclear scos dintr-un reactor şi tratat ca deşeu radioactiv.*

Combustibil ceramic*: combustibil nuclear format din compuşi refractari (oxizi şi carburi).*

Combustibil fosil: *combustibil (cărbune, petrol, gaze naturale) bazat pe carbon presupus a proveni din substanţă cândva vie.*

Combustibil îmbogăţit: *combustibil nuclear conţinând uraniu îmbogăţit în nuclee fisile.*

Combustibil în dispersie: *combustibil nuclear sub formă de particule dispersate într-un alt material.*

Combustibil metalic*: uraniu natural în formă metalică utilizat în reactoare nucleare răcite cu gaz.*

Combustibil metaloceramic*: combustibil nuclear alcătuit dintr-un amestec intim de compuşi metalici şi compuşi refractari, cel puţin una din faze conţinând materiale fisile.*

Combustibil nuclear: *material conţinând radionuclizi fisili, care, amplasat într-un reactor, este capabil să dezvolte o reacţie nucleară în lanţ autoîntreţinută.*

Combustibil sub formă de oxizi*: uraniu natural sau îmbogăţit utilizat în majoritatea reactoarelor nucleare sub forma oxizi; de exemplu* UO_2.

Condiţionarea deşeurilor: *reguli referitoare la operaţiunile destinate convertirii deşeurilor într-o formă adaptată pentru transport / stocare / depozitare finală, inclusiv reciclarea.*

Contaminare nocivă: *prezenţa substanţelor sau a unor forme nocive de energie (zgomot, vibraţie, radiaţie, căldură etc.) într-un mediu dat, care deteriorează condiţiile ambiante pentru viaţă (oameni, animale sau plante).*

Controlul reactorului: *modificări intenţionate ale vitezei de reacţie într-un reactor nuclear, prin ajustarea reactivităţii.*

Critic: *calificativ referitor la un mediu al reacţiei nucleare în lanţ, având un factor de multiplicare efectiv egal cu unitatea.*

Critic întârziat*: stare de criticitate a unui sistem atinsă şi menţinută cu ajutorul neutronilor întârziaţi.*

Critic prompt: *sistem care îndeplineşte condiţiile ca mediul în care are loc reacţia nucleară în lanţ să devină critic, numai datorită neutronilor prompţi.*

Criticitate: *stare unui mediu critic care are un factor de multiplicare a neutronilor egal cu unitatea.*

Curie (Ci): *Unitate veche de măsură a radioactivităţii: 1 Ci = 3,7 × 10^{10} Bq.*

D

Debit al dozei absorbite: *cantitatea de doză absorbită în unitatea de timp.*

Decontaminare: *acţiune de eliminare (îndepărtare) a contaminanţilor.*

Depozit (de deşeuri radioactive): *instalaţie nucleară în care sunt depozitate deşeurile radioactive, fără intenţia utilizării lor ulterioare.*

Deşeuri înalt radioactive: *1) lichid foarte radioactiv, conţinând în esenţă produşi de fisiune, precum şi anumite actinide; 2) combustibil ars din reactor, dacă este declarat deşeu; 3) orice alt deşeu cu un nivel de radioactivitate comparabil cu 1) sau 2).*

Deşeuri scăzut şi mediu radioactive: *deşeuri radioactive cu concentraţie sau cantitate de radionuclizi peste nivelele stabilite de autoritatea în domeniu, dar conţinut de radionuclizi şi putere termică generată mai mici decât la deşeurile de nivel înalt.*

Deuteriu (D): *„hidrogen greu", un izotop stabil având în nucleu un proton şi un neutron; în natură se întâlneşte, în medie, 1 atom de deuteriu la 6500 atomi de hidrogen.*

Dezintegrare nucleară: *transformare a unui nucleu compus prin scindarea lui în mai multe fragmente, sau prin emisie de particule.*

Dezintegrare radioactivă: *transformare nucleară spontană în care fie se emit particule sau radiaţii gamma, fie se emite o radiaţie X în urma capturării unui electron orbital, fie un nucleu suferă o fisiune spontană.*

Doză absorbită: *energie (provenind de la radiaţii ionizante) absorbită de unitatea de masă din ţesuturile vii.*

E

Ecran biologic: *cantitate de material absorbant (de exemplu, pereţi groşi din beton) plasată în jurul unui reactor sau material radioactiv în vederea readucerii radiaţiilor (în mod special neutroni şi raze gamma) la un nivel sigur pentru corpul omenesc.*

Efect Compton: *împrăştierea elastică a unui foton de către un electron (considerat liber şi staţionar).*

Efect Wigner: *în funcţionarea unui reactor, variaţia proprietăţilor fizice ale grafitului ca rezultat al deplasării atomilor din reţeaua cristalină, datorită ciocnirilor cu particule de mare energie.*

Electron: *particulă elementară ce intră în structura atomului, având sarcina electrică de 1,60217733 × 10^{-19} C şi masa de repaus de 9,1093897× 10^{-31} kg.*

Element chimic: *specie de atomi având acelaşi număr de protoni.*

Element combustibil: *cel mai mic element cu structură proprie dintr-un reactor nuclear, având în compoziţie ca principal component combustibil nuclear; exemple de elemente combustibile: placă, bară, bilă.*

Energie nucleară*: energie eliberată în reacţii sau tranziţii nucleare.*

Energie Wigner*: energie acumulată în grafit prin efect Wigner.*

Excursia reactorului: *creştere foarte rapidă a puterii unui reactor, peste nivelul normal de funcţionare.*

F

Fascicul combustibil: *structură solidă formată din elemente combustibile.*

Fertil: *1) calificativ referitor la un nuclid capabil să se transforme direct sau indirect într-un nuclid fisionabil, prin captură de neutroni; 2) material conţinând unul sau mai mulţi radionuclizi fertili.*

Fisil: *1) proprietate a unui nuclid de a suferi o fisiune prin interacţia cu neutroni lenţi; 2) material conţinând unul sau mai mulţi radionuclizi fisili.*

Fisiune nucleară: *spargere a nucleelor grele în două părţi, însoţită de emiterea unei cantităţi relativ mari de energie şi, uzual, unul sau mai mulţi neutroni; poate fi spontană, dar cel mai adesea are loc atunci când un nucleu absoarbe un neutron şi devine instabil.*

Foton: *cuantă de radiaţie electromagnetică.*

Fotoneutron: *neutron emis în urma interacţiunii unui foton cu un nucleu.*

Fracţie de vid*: raport între volumul vidului şi volumul total al moderatorului şi al vidului.*

Fragment de fisiune: *nucleu care provine dintr-o fisiune şi care posedă o energie cinetică obţinută prin această fisiune.*

Fuziune nucleară*: procesul în care nucleele intră în reacţie de fuziune (unire).*

G

Gaz de fisiune: *produs de fisiune sub formă gazoasă.*

Grafit*: carbon cristalin folosit în formă foarte pură ca moderator de neutroni, de obicei în reactoarele nucleare răcite cu gaz, dar şi în cele de tip RBMK.*

Gray (Gy): *unitate de măsură în SI (Sistem Internaţional) pentru doza de radiaţie absorbită; 1 Gy = 1 J / 1 kg.*

I

Ion: *atom încărcat cu sarcină electrică prin pierdere sau câştige de electroni.*

Iradiere: *supunere a unui material acţiunii radiaţiilor ionizante; combustibilul nuclear dintr-un reactor precum şi alte componente ale reactorului sunt supuse iradierii cu neutroni, devenind în acest fel, la rândul lor, radioactive.*

Izotop: *atom al unui element chimic, având un număr particular de neutroni; diferiţi izotopi ai unui element chimic au acelaşi număr de protoni dar numere diferite de neutroni, diferind, deci prin numărul lor de masă; exemplu ^{235}U, ^{238}U; unii izotopi sunt instabili şi se dezintegrează transformându-se în izotopi ai altor elemente.*

Izotop fertil: *izotop capabil să devină fisil, prin captură de neutroni: de exemplu ^{238}U şi ^{240}Pu.*

Izotop fisil: *izotop capabil să capteze un neutron termic şi să sufere o fisiune nucleară: de exemplu, ^{235}U, ^{233}U, ^{239}Pu.*

Izotop fisionabil: *izotop capabil să sufere o fisiune nucleară; dacă nu este şi fisil, fisiunea suferită are loc sub acţiunea neutronilor rapizi.*

M

Masă critică*: cea mai mică masă de material fisil care mai poate să auto-susţină o reacţie de fisiune în lanţ, în condiţii specificate.*

Miezul reactorului: *zona centrală a unui reactor nuclear conţinând elementele combustibile şi moderatorul.*

Moderator: *substanţă (cum ar fi apa uşoară, sau apa grea, sau grafitul) utilizată într-un reactor nuclear în vederea încetinirii neutronilor rapizi prin ciocnirea lor cu nuclee mai uşoare.*

N

Neutron: *particulă elementară neutră din punct de vedere electric, găsită în nucleele tuturor atomilor, cu excepţia hidrogenului; în timpul reacţiilor de fisiune se eliberează neutroni liberi ce se pot deplasa cu diferite viteze; neutronii încetiniţi (neutroni termici) pot determina fisiunea izotopilor fisili (^{235}U), iar neutronii rapizi pot determina fisiunea izotopilor fertili (^{238}U); neutronii pot fi captaţi de unele nuclee atomice şi fără să provoace dezintegrarea acestora.*

Neutroni întârziați: *neutroni emişi, timp de cel mult câteva secunde după reacția de fisiune, de produşii de fisiune; neutronii întârziați sunt importanți în procesul de control al reacțiilor de fisiune dintr-un reactor nuclear.*

Neutroni rapizi: *neutroni emişi în timpul unei fisiuni nucleare, deplasându-se cu o viteze foarte mare (~20.000 km/s) şi având energii de aproximativ 2 MeV.*

Nuclid: *reprezentant al unei specii de atomi având nuclee identice, adică având acelaşi număr atomic şi acelaşi număr de masă.*

P

Particulă alfa: *particulă încărcată cu sarcină electrică pozitivă, emisă din nucleul unui atom prin dezintegrare radioactivă; particulele alfa sunt nuclee de heliu, cu doi protoni şi doi neutroni.*

Particulă beta: *particulă emisă de un atom în timpul dezintegrării radioactive; particulele beta pot fi atât electroni (cu sarcină electrică negativă) sau pozitroni (cu sarcină electrică pozitivă).*

Plutoniu (Pu): *element transuranic, format într-un reactor nuclear prin captură de neutroni; are mai mulți izotopi, unii dintre aceştia fiind fisili, suferind chiar şi fisiuni spontane, cu emisie de neutroni; aproape o treime din energia obținută într-un reactor cu apă uşoară provine din fisiunea ^{239}Pu, şi acesta este principala izotop recuperat prin reprocesarea combustibilului ars.*

Produs de activare: *izotop radioactiv al unui element care a fost creat prin bombardare cu neutroni (de exemplu, în oțelul din miezul unui reactor nuclear).*

Produşi de fisiune: *nucleele „fiice" rezultate fie în urma fisiunii nucleare a elementelor grele, cum ar fi uraniul, fie în urma dezintegrării radioactive a înseşi acestor prime „fiice"; în general sunt înalt radioactivi.*

R

Radiație: *emisia şi propagarea energiei prin intermediul undelor electromagnetice sau a particulelor.*

Radiație de fond*: radiație ionizantă naturală, provenind atât din crusta terestră (radonul, de exemplu) cât şi din spațiul extraterestru, la care este expusă populația.*

Radiație gamma: *radiație electromagnetică de înaltă energie provenită din nucleul atomic, virtual identică cu razele X.*

Radiație ionizantă: *radiație (incluzând şi particulele alfa) capabilă să rupă legături chimice, cauzând astfel, ionizarea substanței prin care trece şi producerea de daune țesuturilor vii.*

Radioactivitatea: *dezintegrarea spontană a unui nucleul atomic instabil, fenomen însoțit de emisie de radiații.*

Radionuclid: *izotop radioactiv.*

Radiotoxicitate: *efect dăunător sănătății al unui radionuclid, datorită radioactivității sale.*

Reactor nuclear: *instalație în care se inițiază și se menține sub control o reacție de fisiune nucleară în lanț; toate reactoarele comerciale sunt de tip termic, adică folosesc moderator pentru termalizarea neutronilor.*

Reactor nuclear cu neutroni rapizi: *reactor nuclear fără moderator și care utilizează neutroni rapizi.*

Reacție în lanț: *reacție care stimulează propria-i repetiție (automenținere); în cazul particular al unei reacții de fisiune nucleară în lanț, neutronii provenind de la o fisiune nucleară cauzează noi reacții de fisiune.*

Reprocesare: *tratare chimică a combustibilului nuclear ars în vederea separării uraniului și plutoniului (și alte posibile elemente transuranice din cantități mici de produși de fisiune).*

S

Sievert (Sv): *unitate de măsură ce indică daunele biologice cauzate de radiații; energia de 1 J provenită de la radiație beta sau gamma și absorbită de 1 kg de țesut produce un efect biologic de 1 Sv; 1 J/kg de radiație alfa produce un efect biologic de 20 Sv, iar 1 J/kg de neutroni produce un efect biologic de 10 Sv.*

T

Timp de înjumătățire: *perioadă de timp necesară dezintegrării unei jumătăți din numărul de atomi ai unui izotop radioactiv oarecare, transformându-se, astfel, în izotopi ai unui alt element.*

U

Uraniu (U): *element mediu-radioactiv cu doi izotopi fisili: ^{235}U și ^{233}U și doi izotopi fertili: ^{238}U și ^{234}U; este combustibilul de bază al energiei nucleare.*

Uraniu îmbogățit: *uraniu în care proporția izotopului ^{235}U a fost crescută peste valoarea naturală de 0,7%.*

Uraniu înalt (puternic) îmbogățit: *uraniu îmbogățit cu o concentrație de cel puțin 20% ^{235}U; în cazul armelor nucleare se poate ajunge la concentrații de 90% ^{235}U.*

Uraniu natural: *uraniu cu compoziția izotopică întâlnită în natură, adică 99,3% ^{238}U și 0,7% ^{235}U și unele urme de ^{234}U; poate fi utilizat drept combustibil nuclear în reactoarele moderate cu apă grea.*

Uraniu sărăcit: *uraniu având o concentrație de izotopi de ^{235}U mai mică decât concentrația naturală de 0,7%.*

Uraniu slab îmbogățit: *uraniu îmbogățit cu o concentrație mai mică de 20% ^{235}U; în reactoare nucleare se foloseşte în mod uzual uraniu îmbogățit de până la 3,5 ÷ 5,0% ^{235}U.*

V

Vas de presiune (al unui reactor): *recipient din oțel conținând combustibilul nuclear, moderatorul şi agentul de răcire presurizat.*

Z

Zircaloy: *aliaj de zirconiu folosit la fabricarea barelor (elementelor) şi a fasciculelor combustibile.*

Zirconiu: *metal cu aspect cenuşiu lucitor, cu secțiune mică de absorbție a neutronilor, cu rezistență mecanică apropiată de cea a oțelurilor (în stare aliată) şi rezistență la coroziune foarte bună.*

- WIKIPEDIA, the free encyclopedia that anyone can edit

Wikipedia este o enciclopedie liberă şi multilingvă.

Bazată pe voluntariat, Wikipedia este dedicată realizării de resurse educaționale, culturale şi informaționale *online*, de tip *open source*. Proiectul în limba română a prins viață în 2004.

Articolele Wikipedia pot conține fragmente de text, imagini, înregistrări audio şi orice alt fel de materiale în următoarele condiții:

- Materialul respectiv aparține domeniului public, adică nu există un titular al drepturilor de autor. Acest lucru se poate întâmpla atunci când materialul nu se pretează la rezervarea drepturilor intelectuale, când autorul a renunțat explicit la drepturile sale asupra lui sau când termenul drepturilor de autor a expirat. În România acest termen expiră în general la 70 de ani de la moartea autorului.

- Materialul este protejat de drepturi de autor, dar titularul acestora a permis utilizarea materialului în orice scop. Limitarea la scopuri necomerciale **nu** este suficientă, întrucât Wikipedia pune conținutul său la dispoziția tuturor, pentru utilizare în orice scop, inclusiv comercial.

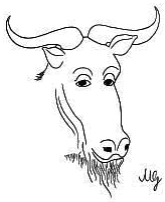
- Materialul este protejat de drepturi de autor, dar folosirea unei mici părți din el poate fi considerată *utilizare cinstită*. De exemplu, un mic fragment din înregistrarea audio a unei piese muzicale, o imagine cu o rezoluție evident inferioară față de original, un fragment de text de până la 500 de caractere (dar care nu depăşeşte jumătate) dintr-o operă literară, publicistică, etc. În toate aceste cazuri trebuie menționată sursa materialului.

- Materialul este oferit sub o licență liberă, de exemplu GNU FDL sau similară, prin care poate fi utilizat de către oricine în orice scop.

Atunci când un material nu menționează nimic despre rezervarea drepturilor de autor se consideră că aceste drepturi sunt *implicite*, iar materialul nu poate fi folosit la Wikipedia decât în măsura condițiilor prezentate mai sus.

Nu se pot cere daune consecvente în Wikipedia.

Informația din Wikipedia este oferită gratuit şi nu există nici o înțelegere între utilizator şi Wikipedia privind folosirea şi modificarea acestei informații în afara *Licenței GNU pentru Documentație Liberă*.



- LICENȚIEREA GNU FDL

Aceasta este o traducere neoficială în limba română a *Licenței GNU pentru Documentație Liberă* (GNU Free Documentation Licence).

Textul original al licenței, în limba engleză, se găsește și poate fi descărcat de la: http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html

Licența GNU pentru Documentație Liberă (GNU Free Documentation Licence)

Versiunea 1.2 din noiembrie 2002.

Copyright (C) 2000, 2001, 2002 Free Software Foundation, Inc. 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

Oricine poate copia și distribui copii identice ale acestui document, dar modificarea lui nu este permisă.

0. PREAMBUL

Scopul acestei Licențe este de a conferi unui set de instrucțiuni, manual școlar sau altui document folositor "libertate", înțeleasă în sensul următor: asigură tuturor libertatea de a copia și redistribui textul, cu sau fără modificări, în scopuri comerciale și necomerciale. Ca scop secundar, această Licență rezervă pentru autor și editor dreptul de a fi creditați pentru munca lor și de a nu fi responsabili pentru modificările efectuate de alții.

Această Licență conferă un fel de "copyleft", ceea ce înseamnă că lucrările derivate trebuie să fie și ele libere în sensul de mai sus. Această Licență este inspirată de Licența Publică Generală GNU (GNU General Public Licence, GNU GPL), care este o licență similară concepută pentru a acoperi softul liber.

Această Licență a fost scrisă pentru a acoperi manuale pentru soft liber, pentru că softul liber necesită documentație liberă: un program trebuie însoțit de manuale care oferă aceeași libertate în folosire ca și

softul. Această Licență nu este limitată la manuale pentru soft şi poate fi folosită pentru a acoperi orice lucrare, indiferent de subiect sau de modul de publicare. Această Licență este recomandată în principal pentru lucrări care servesc drept referință sau au fost scrise în scop de instruire.

1. APLICABILITATE ŞI DEFINIȚII

Această Licență se aplică oricărui manual sau lucrări, în orice mediu, care conține o notă inclusă de către deținătorul dreptului de autor ce permite distribuția sub acoperirea acestei Licențe. Această notă conferă dreptul universal (world-wide), fără indemnizație şi nelimitat ca durată de a folosi această lucrare în condițiile descrise de această Licență. Termenul "Documentul" folosit mai jos se referă la manualul sau lucrarea acoperită de Licență. Orice membru al publicului este un beneficiar al acestei Licențe şi va fi desemnat prin termenul "Dvs." sau prin folosirea persoanei a doua. Se consideră în mod automat că ați acceptat termenii acestei Licențe dacă copiați, modificați sau distribuiți Documentul într-un mod ce necesită permisiunea autorului în conformitate cu legea drepturilor de autor.

O "Versiune Modificată" a Documentului este orice lucrare conținând Documentul sau o porțiune din Document, copiată identic sau cu modificări şi / sau tradusă într-o altă limbă.

O "Secțiune Secundară" este o anexă cu titlu, sau o secțiune menționată în cuprins care are ca scop exclusiv descrierea relației editorilor sau a autorilor Documentului cu subiectul Documentului (sau cu subiecte legate de acesta) şi care nu conține subiecte incluse în mod direct în subiectul Documentului. (Aşadar, dacă Documentul este în parte manual de matematică, o Secțiune Secundară nu poate conține explicații matematice.) Relația poate fi o conexiune istorică cu subiectul sau cu problemele înrudite cu subiectul, sau puncte de vedere legale, comerciale, filozofice, etice sau politice legate de acesta.

"Secțiunile Invariante" sunt anumite Secțiuni Secundare ale căror titluri sunt specificate ca fiind titluri de Secțiuni Invariante din Document în nota ce permite distribuția Documentului sub acoperirea acestei Licențe. Dacă o secțiune nu este conformă cu definiția de mai sus a unei Secțiuni Secundare ea nu poate fi desemnată drept Secțiune Invariantă. Documentul poate să nu conțină nici o Secțiune Invariantă. Dacă Documentul nu specifică nici o Secțiune Invariantă se consideră că nu există nici una.

"Textele De Copertă" sunt pasaje scurte de text care sunt listate ca Texte Pentru Coperta I (coperta din față) şi Texte Pentru Coperta IV (coperta din spate) în nota ce permite distribuția Documentului sub

acoperirea acestei Licenţe. Un Text Pentru Coperta I poate avea cel mult 5 cuvinte, iar un Text Pentru Coperta IV poate avea cel mult 25 de cuvinte.

O copie "Transparentă" a Documentului este o copie în format electronic, reprezentată într-un format a cărui specificaţie este disponibilă publicului, care este uşor de modificat folosind un editor de text generic sau (pentru imagini compuse din pixeli) un editor grafic generic sau (pentru desene) un editor larg răspândit de grafică vectorială, şi care poate fi folosit de către programe de formatare de text sau de către programe de conversie în alte formate care pot fi folosite ca intrare de către programe de formatare a textului. O copie făcută într-un format de fişier Transparent dar care prin prezenţa sau absenţa anumitor elemente specifice formatului descurajează sau împiedică modificările ulterioare nu este o copie Transparentă. Un format grafic - o imagine - nu este un format Transparent dacă este folosit pentru a reprezenta o cantitate substanţială de text. O copie care nu este "Transparentă" este "Opacă".

Exemple de formate compatibile cu copiile Transparente includ: text ASCII fără marcare, format de intrare Texinfo, format de intrare LaTeX, SGML şi XML folosind un DTD public, HTML simplu şi standard, fişiere PostScript şi PDF modificabile. Exemple de formate Transparente pentru imagine includ PNG, XCF şi JPG. Formatele Opace includ formate de text ce pot fi citite şi editate doar de procesoare de text particulare (proprietary), SGML şi XML pentru care DTD-ul şi / sau uneltele de procesare nu sunt disponibile, HTML generat automat, documente PostScript şi PDF produse de diverse procesoare de text exclusiv în scopul printării / afişării.

"Pagina de Titlu" înseamnă, pentru o carte tipărită, pagina cu titlul şi paginile următoare necesare pentru a tipări lizibil materialul care trebuie tipărit conform acestei Licenţe pe Pagina de Titlu. Pentru lucrări care nu au o pagină cu titlu propriu-zisă "Pagina de Titlu" este textul aflat lângă principala apariţie a titlului lucrării, precedând începutul corpului Documentului.

O secţiune "Numită XYZ" este o secţiune din Document al cărei titlu este fie XYZ sau conţine XYZ în paranteze după textul care traduce XYZ în altă limbă. (Aici XYZ înlocuieşte nume specifice ce vor fi menţionate mai jos, ca de exemplu "Mulţumiri", "Dedicaţii", "Giruri" (Endorsement) şi "Istorie".) A "Păstra Titlul" unei astfel de secţiuni atunci când modificaţi Documentul înseamnă că aceasta rămâne "Numită XYZ" conform acestei definiţii.

Documentul poate include Limitări de Responsabilitate (Warranty Disclaimers) ataşate notificării care afirmă că această Licenţă se aplică

Documentului. Aceste Limitări de Responsabilitate se consideră a fi incluse pentru referință în această Licență: orice alte implicații pe care aceste Limitări de Responsabilitate le-ar putea avea sunt nule şi nu au nici un efect asupra înțelesului acestei Licențe.

2. COPII IDENTICE

Puteți copia şi distribui Documentul pe orice mediu, comercial sau necomercial, atâta timp cât această Licență, notificările de drepturi de autor şi notificarea de licență care spune că această Licență se aplică acestui Document sunt reproduse în toate copiile, şi atâta timp cât nu adăugați nici un fel de altă condiție în afară de cele prezente în această Licență. Nu aveți dreptul să luați măsuri tehnice de a obstrucționa sau controla citirea sau recopierea copiilor pe care le faceți sau le distribuiți. Aveți totuşi dreptul să acceptați compensații în schimbul copiilor. Dacă distribuiți un număr suficient de mare de copii trebuie să respectați şi condițiile din secțiunea 3.

Aveți de asemenea dreptul să împrumutați copii în aceleaşi condiții ca cele de mai sus, şi aveți dreptul să afişați copii.

3. COPIEREA ÎN CANTITĂȚI MARI

Dacă publicați copii tipărite (sau copii în medii care folosesc de obicei coperte tipărite) ale Documentului, în număr mai mare de 100 şi dacă notificarea de licență a Documentului cere Texte de Copertă, trebuie să includeți copiile pe coperte care să conțină, clar şi lizibil, toate aceste Texte de Copertă: Textele Pentru Coperta I pe coperta I şi Texte Pentru Coperta IV pe coperta IV. Ambele coperte trebuie de asemenea să vă identifice în mod clar şi lizibil ca editor al respectivelor copii. Coperta I trebuie să prezinte titlul în întregime, cu toate cuvintele din titlu la fel de vizibile şi proeminente. Puteți adăuga alte materiale pe copertă în plus. Copierea cu modificările limitate la coperte, atâta timp cât satisfac aceste condiții, pot fi tratate în toate celelalte aspecte ca şi copii identice.

Dacă textele necesare pentru oricare dintre coperte sunt prea voluminoase pentru a încăpea în mod lizibil, trebuie să le includeți pe primele în ordinea originală (atâtea câte încap în mod rezonabil) pe coperta efectivă şi să continuați cu restul pe pagini adiacente.

Dacă publicați sau distribuiți copii Opace ale documentului în număr mai mare de 100, trebuie ori să includeți câte o copie Transparentă în format electronic împreună cu fiecare copie Opacă, sau să specificați în

sau împreună cu fiecare copie Opacă o locație de rețea electronică la care publicul general care folosește rețeaua să aibă acces pentru a descărca, folosind un protocol standard public, copii complete Transparente ale documentului, fără adăugarea oricărui material adițional. Dacă folosiți a doua opțiune trebuie să faceți demersuri rezonabil de prudente ca atunci când începeți distribuirea copiilor Opace să vă asigurați că această copie Transparentă va rămâne accesibilă în acest fel la locația respectivă timp de cel puțin un an după distribuția ultimei copii Opace (în mod direct sau prin agenți sau distribuitori) a acelei ediții pentru public.
Se cere, dar nu în mod necesar, să contactați autorii Documentului cu o perioadă bună înainte de a distribui orice cantitate mare de copii, pentru a le da ocazia să vă pună la dispoziție o versiune actualizată a Documentului.

4. MODIFICĂRI

Puteți copia şi distribui o Versiune Modificată a Documentului în condițiile secțiunilor 2 şi 3 de mai sus, cu condiția de a acoperi Versiunea Modificată sub exact această Licență, cu Versiunea Modificată ținând locul Documentului, astfel licențiind distribuirea şi modificările Versiunii Modificate oricui intră în posesia unei copii ale acesteia. În plus, trebuie să faceți următoarele lucruri în Versiunea Modificată:

- **A)** *Folosiți în Pagina de Titlu (şi pe coperte, dacă există) un titlu diferit de cel al Documentului, şi de versiunile sale anterioare (care trebuie, dacă există, să fie listate în secțiunea de Istorie a Documentului). Puteți folosi același titlu ca o versiune anterioară dacă editorul original al acelei copii vă dă permisiunea.*
- **B)** *Listați pe Pagina de Titlu, ca autori, una sau mai multe dintre persoanele sau entitățile responsabile în calitate de autori pentru modificările Versiunii Modificate, împreună cu cel puțin cinci dintre autorii principali ai Documentului (toți autorii principali, dacă are mai puțin de cinci), în afară de cazul că aceştia vă eliberează de această obligație.*
- **C)** *Includeți pe Pagina de Titlu numele editorului Versiunii Modificate în calitate de editor.*
- **D)** *Păstrați toate notificările de drepturi de autor ale Documentului.*
- **E)** *Adăugați o notificare de drepturi de autori relevantă pentru modificările Dvs. adiacent celorlalte notificări de drepturi de autor.*

F) *Includeți, imediat după notificările de drepturi de autor, o notificare de licență dând permisiune publică de a folosi Versiunea Modificată în condițiile acestei Licențe, sub forma prezentată în Apendicele de mai jos.*

G) *Păstrați în acea notificare de licență lista integrală a Secțiunilor Invariante şi Textele de Copertă necesare date în notificarea de licență a Documentului.*

H) *Includeți o copie nealterată a acestei Licențe.*

I) *Păstrați secțiunea Numită "Istorie", Păstrați-i Titlul şi adăugați-i un element care să indice măcar titlul, anul, noii autori şi editorul Versiunii Modificate aşa cum este dat pe Pagina de Titlu. Dacă nu există o secțiune Numită "Istorie" în Document, creați una în care indicați titlul, anul, autorii şi editorul Documentului aşa cum este dat pe Pagina de Titlu al acestuia şi apoi adăugați un element care să descrie Versiunea Modificată aşa cum a fost cerut în fraza precedentă.*

J) *Păstrați locația de rețea, dacă există, dată în Document pentru acces public la o copie Transparentă a Documentului, cât şi locațiile de rețea date în Document pentru versiunile mai vechi pe care s-a bazat acesta. Acestea pot fi incluse în secțiunea Numită "Istorie". Puteți omite locația de rețea a unei lucrări care a fost publicată cu cel puțin patru ani înainte de Documentul în sine, sau dacă editorul original al versiunii la care se referă vă dă permisiunea.*

K) *Pentru orice secțiune Numită "Mulțumiri" sau "Dedicații" Păstrați Titlul secțiunii şi păstrați în secțiunile respective toată substanța şi tonul mulțumirilor şi dedicațiilor fiecărui contribuitor.*

L) *Păstrați toate Secțiunile Invariante ale Documentului, nealterate ca text şi ca titluri. Numerotarea secțiunilor sau echivalentul numerotării nu sunt considerate ca făcând parte din titlurile secțiunilor.*

M) *Ştergeți orice secțiune Numită "Giruri". O astfel de secțiune nu poate fi inclusă în Versiunea Modificată.*

N) *Nu modificați titlul nici unei secțiuni existente pentru a fi Numită "Giruri" sau pentru a intra în conflict cu vreo Secțiune Invariantă.*

O) *Păstrați toate Limitările de Responsabilitate.*

Dacă Versiunea Modificată include secţiuni noi incluse în titlu sau anexe care se califică drept Secţiuni Secundare şi nu conţin material copiat din Document, aveţi dreptul la alegerea Dvs. să numiţi unele sau toate acestea ca fiind secţiuni invariante. Pentru a face aceasta, adăugaţi-le titlurile la lista de Secţiuni Invariante în notificarea de licenţă a Versiunii Modificate. Aceste titluri trebuie să fie distincte faţă de toate celelalte titlurile de secţiune.

Puteţi adăuga o secţiune Numită "Giruri" doar dacă aceasta conţine numai girurile a diverse entităţi asupra Versiunii Modificate - de exemplu recenzii sau faptul că textul a fost aprobat de o organizaţie ca fiind o definiţie autoritară a unui standard.

Puteţi adăuga un pasaj de cel mult cinci cuvinte ca Text Pentru Coperta I şi un pasaj de cel mult 25 de cuvinte ca Text Pentru Coperta IV la sfârşitul Textelor De Copertă în Versiunea Modificată. Numai un singur pasaj poate fi adăugat la Textul Pentru Coperta I şi unul la Textul Pentru Coperta IV de către (sau prin aranjament cu) orice entitate. Dacă Documentul conţine deja texte de copertă pentru coperta respectivă, adăugat în prealabil de Dvs. sau prin aranjament cu aceeaşi entitate în numele căreia acţionaţi, atunci nu puteţi adăuga un altul, însă puteţi să-l înlocuiţi pe cel vechi numai cu permisiunea explicită a editorului anterior care l-a adăugat pe cel vechi.

Autorul (autorii) şi editorul (editorii) Documentului nu vă dau prin această Licenţă permisiunea de a le folosi numele pentru publicitate sau pentru a pretinde sau implica vreo girare a oricărei Versiuni Modificate.

5. COMBINAREA DOCUMENTELOR

Puteţi combina Documentul cu alte documente acoperite de această Licenţă sub termenii definiţi în secţiunea 4 de mai sus pentru versiuni modificate, cu condiţia să includeţi în versiunea combinată toate Secţiunile Invariante ale tuturor documentelor originale, nemodificate, şi să le listaţi pe toate ca Secţiuni Invariante ale versiunii combinate în notificarea de licenţă, cât şi să păstraţi toate Limitările de Responsabilitate.

Versiunea modificată nu trebuie să conţină decât o singură copie a acestei Licenţe, iar duplicatele identice ale Secţiunilor Invariante pot fi înlocuite cu o singură copie. Dacă există Secţiuni Invariante cu nume identice şi conţinut diferit, schimbaţi-le numele adăugând la sfârşitul titlului, în paranteză, ori numele autorului sau al editorului original al acelei secţiuni dacă acesta este cunoscut, ori un număr unic. Faceţi

aceleaşi modificări respective titlurilor secţiunilor în lista de Secţiuni Invariante din notificarea de licenţă a versiunii combinate.

În versiunea combinată trebuie să combinaţi şi toate secţiunile Numite "Istorie" din diversele documente originale, creând o secţiune unică Numită "Istorie"; la fel trebuie să combinaţi şi toate secţiunile Numite "Mulţumiri" cât şi cele Numite "Dedicaţii". Trebuie să ştergeţi toate secţiunile Numite "Giruri".

6. COLECŢII DE DOCUMENTE

Puteţi crea o colecţie formată din Document şi alte documente acoperite de această Licenţă şi să înlocuiţi copiile individuale ale acestei Licenţe din diversele documente cu o singură copie care să fie inclusă în colecţie cu condiţia să urmaţi regulile acestei Licenţe pentru copii identice pentru fiecare document în toate celelalte privinţe.

Puteţi să extrageţi un document dintr-o astfel de colecţie şi să-l distribuiţi individual sub această Licenţă cu condiţia de a include o copie a acestei Licenţe în documentul extras şi să urmaţi condiţiile acestei Licenţe în toate celelalte privinţe în legătură cu copiile identice ale acelui document.

7. AGREGAREA CU LUCRĂRI INDEPENDENTE

O compilaţie a Documentului sau a unui derivat al său cu orice document sau lucrare separată independentă, în sau pe un volum de stocare sau distribuire se numeşte "agregat" dacă drepturile de autor rezultate în urma compilării nu sunt folosite pentru a limita drepturile legale ale utilizatorilor compilaţiei mai mult decât permit lucrările individuale. Când Documentul este inclus într-un agregat, această Licenţă nu se aplică celorlalte lucrări din agregat care nu sunt ele însele rezultate derivate ale Documentului.

Dacă cerinţele legate de Textele de Copertă din secţiunea 3 se aplică acestor copii ale Documentului, atunci dacă Documentul este mai puţin de jumătate din întregul agregat atunci Textele de Copertă ale Documentului pot fi puse pe coperte care să separe Documentul în cadrul agregatului, sau pe un echivalent electronic al acestora, dacă Documentul se prezintă în format electronic. Altfel ele trebuie să apară pe copertele tipărite care îmbracă întreg agregatul.

8. TRADUCERE

Traducerea este considerată o formă de modificare, drept care puteți distribui traduceri ale Documentului sub cerințele secțiunii 4. Înlocuirea Secțiunilor Invariante cu traduceri ale acestora necesită permisiune specială din partea celor care dețin drepturile de autor, însă puteți include traduceri ale unora dintre sau tuturor Secțiunilor Invariante împreună cu variantele originale ale acestora. Puteți include o traducere a acestei Licențe cât şi toate notificările de licență din Document, cât şi Limitările de Responsabilitate atâta timp cât includeți şi versiunea originală în engleză a acestei Licențe, plus versiunile originale ale respectivelor notificări de licență şi limitări de responsabilitate. În cazul apariției oricăror discrepanțe între versiunea tradusă şi versiunea originală a acestei Licențe, a vreunei notificări de licență sau a vreunei limitări de responsabilitate, versiunea originală are prioritate.

Dacă vreo secțiune din Document este Numită "Mulțumiri", "Dedicații" sau "Istorie" cerința (din secțiunea 4) de a-i Păstra Titlul (secțiunea 1) va necesita în mod normal schimbarea titlului în sine.

9. REZILIERE

Nu puteți copia, modifica, sublicenția sau distribui Documentul decât în condițiile specificate explicit în această Licență. Orice copiere, modificare sau redistribuire a Documentului în vreo altă condiție este nulă şi vă va anula în mod automat drepturile conferite de această Licență. Pe de altă parte, terților cărora le veți fi transmis copii sau drepturi în conformitate cu această Licență nu li se vor anula aceste drepturi atâta timp cât i se conformează.

10. VERSIUNI VIITOARE ALE ACESTEI LICENȚE

Fundația Free Software (Free Software Foundation) poate publica versiuni noi, revizuite ale acestei Licențe (GNU Free Documentation Licence) din timp în timp. Aceste noi versiuni vor păstra spiritul acestei versiuni dar pot diferi în privința detaliilor, cu scopul de a se adresa unor noi probleme reale sau potențiale. Vezi http://www.gnu.org/copyleft/.

Fiecărei versiuni ale acestei Licențe îi este asociat un număr de versiune distinct. Dacă Documentul specifică un anumit număr de versiune "sau orice versiune ulterioară" al acestei Licențe, aveți de ales între a vă conforma termenilor şi condițiilor ori ale versiunii specificate explicit sau

ale oricărei variante ulterioare publicate (nu ca variantă preliminară) de către Free Software Foundation. Dacă Documentul nu specifică un număr de versiune al acestei Licențe atunci puteți alege orice versiune publicată (nu ca variantă preliminară) de către Free Software Foundation.